

# **MASTERARBEIT**

## **Laborgroßversuch zur Untersuchung der Austrocknungsvorgänge in den Bettungsmaterialien rund um Fernwärmeleitungen**

am Institut für  
Bodenmechanik und Grundbau  
der  
Technischen Universität Graz

**Nikola Stanisljevic, BSc.**

Betreuer: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

Gutachter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roman Marte

Bearbeitungszeitraum: April 2014 bis Oktober 2014

Graz, 08.11.2014

**MASTERARBEIT-AUSGABEPROTOKOLL**  
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der TU Graz

KANDIDAT: STANISLJEVIC Nikola (Name)	09 31561 / F 033 264/ (Mat.Nr.)/(Studienrichtung) ..... (Unterschrift)
<p>THEMA der Masterarbeit:</p> <p><b>Laborgroßversuch zur Untersuchung der Austrocknungsvorgänge und der Wärmeleitfähigkeitsänderungen in Bettungsmaterialien rund um Fernwärmeleitungen</b></p> <p>ZIELSETZUNG (stichwortartig):</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Literatursuche und -studium</li><li>- Darstellung des Standes der Technik zur Bauausführung von Fernwärmeleitungen</li><li>- Theorie der Wärmeleitung und -übertragung</li><li>- Entwurf eines Großversuches im Technikumsmaßstab mit Temperatur- und Feuchtesensoren</li><li>- Erläuterung der Messprinzipien der unterschiedlichen Messmethoden</li><li>- Kalibrierung der erforderlichen Feuchte- und Temperatursensoren</li><li>- Durchführung des Großversuches im Technikumsmaßstab mit Einbau der Sensoren</li><li>- Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten über die Korrelation mit Dichte, Wassergehalt und Temperatur</li><li>- Ganglinien der Temperatur, des Wassergehalts und der Wärmeleitfähigkeit</li><li>- Darstellung von Temperatur-, Wassergehalts- und Wärmeleitfähigkeitsprofilen zu ausgewählten Zeitpunkten</li><li>- Erkenntnisse, Schlussfolgerungen und Ausblick</li></ul>	
FACHGEBIET: Bodenmechanik und Grundbau ggf. 2. FACHGEBIET:	
BETREUER: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roman Marte (Name)	..... (Unterschrift)
ggf. 2. BETREUER: (Name)	..... (Unterschrift)
mitbetreuender Assistent: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz (Name)	..... (Unterschrift)
AUSGABEDATUM: 8. April 2014	
SPÄTESTER ABGABETERMIN: 3. Oktober 2014	

**Beurteilung:**

Beurteilung erfolgt durch die Betreuer
--

16.6.14   
.....  
Datum und Unterschrift des Studiendekans

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

# Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Zeitraum von April bis November 2014 an der Technischen Universität Graz am Institut für Bodenmechanik und Grundbau. Die Arbeit befasst sich mit der Untersuchung der Austrocknungsvorgänge in den Bettungsmaterialien rund um Fernwärmeleitungen. Dazu werden Temperatur-, Wassergehalts- und Wärmeleitfähigkeitsmessungen durchgeführt.

Ich danke dem Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz für die Gelegenheit, meine Masterarbeit an diesem Institut zu schreiben.

Mein Dank gilt vor allem meinem Betreuer Herrn OR DI Otto Leibniz, der mich im Rahmen der Verfassung der vorliegenden Arbeit intensiv betreut und aktiv mit konkreten Verbesserungsvorschlägen unterstützt hat.

Graz, am [08.11.2014]

[Nikola Stanisljevic, BSc.]

# Kurzfassung

Ziel dieser Masterarbeit ist es zu untersuchen, wie sich Wärme rund um Fernwärmerohre ausbreitet und somit auch zur Austrocknung des Thermosands, der oft als Verfüll- bzw. Bettungsmaterial bei Fernwärmeleitungen zum Einsatz kommt, beiträgt. Ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Thermosands mit Hilfe der zeitlichen Messung der Temperatur und des Wassergehalts zu ermitteln.

Zu Beginn dieser Arbeit, bereits in der Einleitung, soll ein erster Einblick gegeben werden, indem das System, der Aufbau und die Funktionsweise der Fernwärme detailliert erklärt werden. In diesem Kapitel werden auch einige Anforderungen an die Fernwärmerohre sowie an das Bettungsmaterial beschrieben.

Anschließend werden die theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis dieser Masterarbeit notwendig sind, geklärt. Im Rahmen dessen werden im Laufe der Arbeit verwendete Begriffe, Formeln und Definitionen erklärt. Weiters wird aufgezeigt, wie die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  mathematisch berechnet werden kann. Abschließend werden auch die bodenmechanischen Eigenschaften des Thermosands beschrieben.

Das Kapitel „Messeinrichtung“ ist den verschiedenen Temperatur- und Wassergehaltsmesseinrichtungen gewidmet, die eingehend beleuchtet werden. Darüber hinaus wird die Kalibrierung dieser Messeinrichtungen erläutert sowie die Kalibrierungsergebnisse in Form von Diagrammen dargestellt.

In Kapitel 4 wird der Aufbau des Laborgroßversuchs, der den Mittelpunkt dieser Arbeit darstellt, in seinen einzelnen Schritten dargestellt. Zur besseren Verständlichkeit und Übersicht wird abschließend auch ein detaillierter zeitlicher Ablauf des Versuchs geliefert.

Kapitel 5 bietet abschließend eine Auswertung und Interpretation der durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der Messungen sind im Form von Ganglinien und Profilen dargestellt.

Unter den Ganglinien und Profilen, die in diesem Kapitel dargestellt werden, sind jene der Temperatur-, Wassergehalts- und Wärmeleitfähigkeitsentwicklung im Lauf der Zeit sowie die Temperatur- und Wassergehaltsprofile für einen bestimmten Zeitpunkt:

- Die Ganglinien der Temperatur-, Wassergehalts- und Wärmeleitfähigkeitsentwicklung im Lauf der Zeit;
- Die Temperatur- und Wassergehaltsprofile für einen bestimmten Zeitpunkt.

# Abstract

Purpose of this master thesis is to research the behavior of heat near the heat pipes, as well as the dry up of thermo-sand, which is often used as bedding material for long distance heat pipes. The further purpose of this master thesis is to get the thermo conductivity  $\lambda$  of thermo-sand from the measurements of temperature and water content.

At the beginning of this master thesis, in chapter “Introduction” is the system of long distance heat in detail described. There are also some requirements on the long distance heat pipes, as well as on the bedding materials described.

Chapter 2 “Theoretically principles” considers with some terms, equations and definitions, which are important for understanding this master thesis. In this chapter is also described, how to calculate the thermo conductivity  $\lambda$  mathematically. At the end of this chapter the soil mechanical properties of thermo-sand are described.

Chapter 3 is called “measuring system”. In this chapter the temperature and water content measuring system is described. There are also calibrations of those measuring systems as well as the results of the calibrations presented.

In Chapter 4 “Structure of model test” is described the installation of large scale model test. At the end of the chapter the timing of the test is also presented.

Finally, in chapter 5 “evaluation and interpretation of the data” the results of the measurements are presented. These results are presented in form of hydrographs and profiles.

The following hydrographs and profiles are presented in this chapter:

- The hydrographs of the temperature- water content- and thermo conductivity;
- Temperature- and water content profiles for the defined moment.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines	1
1.2	Kraft-Wärme-Kopplung	2
1.2.1	Anlagenübersicht	2
1.3	Fernwärmeleitungen	3
1.3.1	Anforderungen an Leitungssysteme	4
1.3.2	Anforderungen an das Verfüllmaterial der Rohrleitungszone	5
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Begriffe	6
2.1.1	Wassergehalt	6
2.1.1.1	Umrechnung volumetrischer zu gravimetrischer Feuchte	7
2.1.2	Temperatur	7
2.1.3	Temperaturfeld	8
2.1.4	Wärme	9
2.1.5	Wärmestrom und Wärmestromdichte	9
2.1.6	Wärmeleitfähigkeit	9
2.1.7	Wärmeübergangskoeffizient	10

2.2	Berechnung der Wärmeleitung	10
2.2.1	Wärmetransport	10
2.2.2	Wärmeleitung in einer ebenen Wand	10
2.2.3	Wärmeleitung in einem Hohlzylinder	13
2.2.4	Sonstige Wärmeleitungen	14
2.3	Verfüllmaterialien bei Fernwärme	15
2.3.1	Thermosand	15
2.3.1.1	Geschichte	15
2.3.1.2	Bodenmechanische Eigenschaften	16
<b>3</b>	<b>Messeinrichtung</b>	<b>23</b>
3.1	Alte Temperaturmesseinrichtung	23
3.1.1	Kalibrierung der Thermoelemente	25
3.2	Neue Temperaturmesseinrichtung	28
3.3	Wassergehaltsmessung	29
3.3.1	Prinzip der TDR-Technik	29
3.3.2	Kalibrierung der TDR-Sonden	31
3.3.2.1	Kalibrierungsergebnisse	36
<b>4</b>	<b>Aufbau des Modellversuchs</b>	<b>42</b>
4.1	Allgemeines	42



4.2	Einbau der Messfühler	45
4.3	Versuchsablauf	49
4.3.1	Zeitlicher Ablauf des Versuchs	53
<b>5</b>	<b>Auswertung und Interpretation der Daten</b>	<b>55</b>
5.1	Allgemeines	55
5.2	Ganglinien der Temperatur und des Wassergehalts	58
5.3	Ganglinie der Raumtemperatur	63
5.4	Temperatur- und Wassergehaltsprofile	64
5.5	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	67
5.5.1	Allgemeines	67
5.5.2	Ganglinie der Wärmeleitfähigkeit	68
<b>6</b>	<b>Erkenntnisse und Ausblick</b>	<b>71</b>

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Großbuchstaben

$V_w$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen des im Boden vorhandenen Wassers
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Gesamtvolumen des Bodenprismas
$T$	[K]	Temperatur in Kelvin
$\dot{Q}$	[W]	Wärmestrom
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
$C_u$	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
$S_r$	[-]	Sättigungsgrad
$H$	[m]	Höhe

## Kleinbuchstaben

$w$	[%]	gravimetrischer Wassergehalt
$m_w$	[kg]	Masse des im Boden vorhandenen Wassers
$m_d$	[kg]	Trockenmasse des Bodens
$w_g$	[M - %]	gravimetrischer Wassergehalt bei der Temperatur $\vartheta$
$\dot{q}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestromdichte
$s$	[m]	Schichtdicke
$r$	[m]	Radius
$l$	[m]	Länge
$p$	[Pa]	Druck
$t$	[s]	Zeit
$c$	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium
$c_0$	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum
$n$	[-]	Porenanteil
$k_{10}$	[m/s]	Wasserdurchlässigkeit
$d$	[m]	Durchmesser
$i$	[-]	hydraulisches Gefälle
$d_{10}$	[m]	wirksamer Korndurchmesser
$c^c$	[N/m <sup>2</sup> ]	effektive Kohäsion

## Griechische Buchstaben

$\theta$	[%]	volumetrischer Wassergehalt
$\theta_g$	[Vol - %]	volumetrischer Wassergehalt bei der Temperatur $\vartheta$
$\rho_{w,\vartheta}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Wassers bei der Temperatur $\vartheta$
$\vartheta$	[°C]	Temperatur in Celsius
$\rho_d$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Trockendichte des Bodens
$\lambda$	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert
$a$	[W/m <sup>2</sup> K]	Wärmeübergangszahl

$\varepsilon$	[-]	relative Dielektrizitätskonstante
$\rho_{pr}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Proctordichte
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Korndichte
$\varphi$	[°]	Reibungswinkel
$\sigma_n$	[N/m <sup>2</sup> ]	Normalspannung
$\varphi_r$	[°]	Restscherwinkel

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Der Einsatz von Fernwärme für Heizungszwecke ist noch ein relativ junges Phänomen. Die erste Fernheizung wurde in New York im Jahr 1880 eingeführt. In Österreich kam die Fernwärmeversorgung erst nach dem Zweiten Weltkrieg auf. Die ersten Fernwärmeheizungsanlagen Österreichs wurden in Klagenfurt errichtet. Mittlerweile umfasst das Fernwärmeleitungsnetz in Wien über 1000 km und versorgt mehr als 230 000 Wohnungen mit Wärme (Müller et al., 2005).

Der Vorteil dieses Heizsystems gegenüber anderen besteht darin, dass Wärmeabnehmer keine Feuerungsanlage im Haus haben müssen. Die Fernwärme wird nicht in der Wohnung bzw. im Haus erzeugt, sondern i.d.R. in Heizkraftwerken, in sogenannten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Der primäre Zweck solcher Kraftwerke ist die Stromerzeugung. Dazu werden fossile Brennstoffe, wie beispielsweise Kohle, Heizöl und Gas, oder auch Abfall, wie im Wiener Fernheizwerk Spittelau (siehe Abb. 1), verbrannt. Mit Hilfe von Dampfkrafttechnik wird die freie Energie in Strom umgewandelt. Dabei entsteht Wärme als Abfallprodukt. In diesen Anlagen wird Abwärme nicht in die Luft abgegeben, sondern weiter zum Erwärmen von Wasser verwendet, das später für die Fernwärme benutzt wird. Dies erhöht den Nutzungsgrad des Kraftwerkes und macht das Kraftwerk wirtschaftlicher (Müller et al., 2005).



**Abb. 1:** Das Fernwärmeheizwerk Spittelau in Wien (de.wikipedia.org)

## 1.2 Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die Gewinnung von thermischer Nutzenergie aus anderen Energieformen mittels eines thermodynamischen Prozesses in einer technischen Anlage. Der größte Vorteil der KWK ist die besonders wirtschaftliche Energieumwandlung, die sie erlaubt, d. h. eine systematische Nutzung der im Brennstoff enthaltenen Energie (Schmitz & Schaumann, 2003).

Diese Energie wird nicht nur für die Stromerzeugung genutzt, sondern auch für das Erwärmen von Wasser, wodurch der Nutzungsgrad des Kraftwerks deutlich erhöht wird.

### 1.2.1 Anlagenübersicht

Die Erzeugung von Wärme erfolgt laut Schmitz & Schaumann (2003) durch:

- strombedarfsorientierte KWK mit der prioritären Zielenergie Strom. Dabei fällt Wärme als Abfallprodukt an.

- wärmebedarfsorientierte KWK mit der prioritären Zielenergie Wärme.

Im Prinzip wird in KWK-Anlagen elektrische Energie erzeugt. Solche KWK-Anlagen lassen sich folgendermaßen unterteilen (Schmitz & Schaumann, 2003):

- Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Dieselmotor;
- Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Ottomotor;
- Heizkraftwerke basierend auf Gasturbinenanlagen mit nachgeschalteten Abhitzeesseln;
- Gas- und Dampfheizkraftwerke (GuD-Anlagen);
- Heizkraftwerke mit Dampfkesseln und Dampfturbinen;
- Heizkraftwerke mit Dampfkesseln und Dampfmotoren.

### 1.3 Fernwärmeleitungen

Um das erzeugte Warmwasser von den KWK-Anlagen bis zu den Verbrauchern zu transportieren, bedarf es eines Rohrleitungsnetzes.

Über eine Rohrleitung wird die Wärme direkt zu den Abnehmern gepumpt. Normalerweise bildet das Netzwerk einen geschlossenen Kreislauf bestehend aus Vorlauf- und Rücklaufleitungen. Durch die Vorlaufleitung fließt das bis zu 130 °C heiße Wasser bis zum Verbraucher und durch die Rücklaufleitung fließt das abgekühlte Wasser wieder zur KWK zurück (Müller et al., 2005).

Hauptsächlich werden Kunststoffverbundmantelrohre (KVM-Rohre) als Leitungsmaterial verwendet. Diese Rohre bestehen aus einem Mediumrohr aus Stahl, welches mit PU-Schaum umhüllt wird. Dieser Schaum dient als Wärmedämmung. Der PU-Schaum wiederum wird mit Polyethylen ummantelt, das zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen dient (siehe Abb. 2) (Wenigmann, 2011).

Als Wärmeträger wird aufbereitetes Wasser verwendet, das durch Enthärtung, Entsalzung, Entlüftung und den Zusatz von Chemikalien oder auf andere Art und Weise behandelt worden ist, so dass innere Korrosion und Ablagerungen in den Leitungen vermieden werden (ÖNORM EN 13941, 2011).



**Abb. 2:** KVM-Rohre (de.wikipedia.org)

### 1.3.1 Anforderungen an Leitungssysteme

Es gibt folgende Anforderungen an Leitungssysteme für die Fernwärme (ÖNORM EN 13941, 2011):

- ausreichende Dauerhaftigkeit, Widerstandsfähigkeit und Zuverlässigkeit bezüglich der inneren und äußeren Belastungen;
- ausreichende Sicherheit, damit keine unüblichen Betriebsbedingungen oder Unfälle Personen oder die Umwelt gefährden;
- gute Energiewirtschaftlichkeit;
- gute Betriebseigenschaften;
- gesicherte Versorgung.

### 1.3.2 Anforderungen an das Verfüllmaterial der Rohrleitungszone

Das Verfüllmaterial der Rohrleitungszone muss folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Erfüllung der Rohrstatik laut ÖNORM EN 13941;
- Verhinderung von undefinierten Hohlräumen durch geeignete Kornverteilung;
- Aufnahme von Verkehrslasten durch kompakte Bettung;
- Behinderung der Längsdehnung durch definierte Reibung;
- Bei der Berechnung der Wärmeverluste laut ÖNORM EN 13941 Anhang D darf der Einfluss des umgebenden Erdreiches nicht vernachlässigt werden.

Üblicherweise erfüllt Kabelsand oben genannte Anforderungen. Jedoch hat er materialspezifisch eine hohe Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von 1,5 – 1,7 W/mK. Aus diesem Grund kommt es zu ungewünschten Wärmeverlusten.

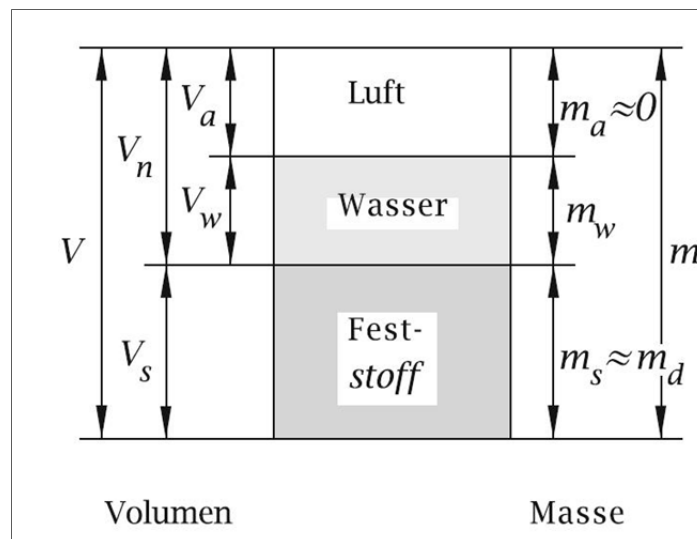
Neben Kabelsand wird auch Thermosand als Verfüllmaterial verwendet. Seine Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von 0,177 – 0,88 W/mK verringert Wärmeverluste deutlich und macht Fernwärme somit noch wirtschaftlicher.



## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Begriffe

#### 2.1.1 Wassergehalt



**Abb. 3:** Boden als Dreiphasenstoff  
(Schmidt et al., 2013)

Alle natürlichen Böden enthalten Wasser. Zur Bestimmung des Wassergehalts muss das im Boden vorhandene Wasser vom Feststoff getrennt werden (siehe Abb. 3). Dies wird durch Trocknen in einem Trockenofen bei 105 °C erreicht. Das gebundene Wasser, das bei dieser Temperatur im Boden bleibt, wird der Masse des Feststoffes zugeordnet (Smolczyk, 1995).

Das Verhältnis des Massenverlustes beim Trocknen  $m_w$  (Masse des Porenwassers) zur verbliebenen Trockenmasse  $m_d$  spiegelt den Wassergehalt wider (siehe Abb. 3) (Smolczyk, 1995):

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad (1)$$

$w$	[%]	gravimetrischer Wassergehalt
$m_w$	[kg]	Masse des im Boden vorhandenen Wassers

$m_d$  [kg] Trockenmasse des Bodens

Wenn die Angabe des Wassergehalts in Massenprozent erfolgt, wird dieser als gravimetrischer Wassergehalt bezeichnet.

Erfolgt die Angabe des Wassergehaltes in Volumprozent, spricht man von volumetrischem Wassergehalt bzw. der volumetrischen Feuchte des Bodens.

Die volumetrische Feuchte  $\theta$  eines Bodens ist das Verhältnis des Wasservolumens  $V_w$  zum Gesamtvolumen  $V$  des Bodenprismas (siehe Abb. 3):

$$\theta = \frac{V_w}{V} \cdot 100 \quad (2)$$

$\theta$  [%] volumetrischer Wassergehalt  
 $V_w$  [m<sup>3</sup>] Volumen des im Boden vorhandenen Wassers  
 $V$  [m<sup>3</sup>] Gesamtvolumen des Bodenprismas

### 2.1.1.1 Umrechnung volumetrischer zu gravimetrischer Feuchte

Der gravimetrische ( $w$ ) und volumetrische Wassergehalt ( $\theta$ ) sind physikalisch miteinander verbunden. Sollte die Trockendichte des Bodens bekannt sein, besteht folgender Zusammenhang zwischen dem volumetrischen Wassergehalt  $\theta$  und dem gravimetrischen Wassergehalt  $w$ :

$$w_g = \frac{\theta_g \cdot \rho_{w,g}}{\rho_d} \quad (3)$$

$w_g$  [M - %] gravimetrischer Wassergehalt bei der Temperatur  $g$   
 $\theta_g$  [Vol - %] volumetrischer Wassergehalt bei der Temperatur  $g$   
 $\rho_{w,g}$  [kg/m<sup>3</sup>] Dichte des Wassers bei der Temperatur  $g$   
 $g$  [°C] Temperatur in Celsius  
 $\rho_d$  [kg/m<sup>3</sup>] Trockendichte des Bodens

### 2.1.2 Temperatur

Die Temperatur  $T$  ist eine physikalische Basisgröße, die den Wärmezustand eines Körpers beschreibt. Nach der SI-Einheitsskala wird die Temperatur in Kelvin angegeben.

In der Praxis wird diese aber auch in Celsius angegeben. Zwischen Temperaturangaben in Celsius und Kelvin besteht folgender Zusammenhang:

$$\vartheta = T - 273,15 \quad (4)$$

$\vartheta$	[°C]	Temperatur in Celsius
$T$	[K]	Temperatur in Kelvin

### 2.1.3 Temperaturfeld

Die Temperatur  $\vartheta$  im Raum ändert sich mit dem Ort  $x$  und der Zeit  $t$ . Das Temperaturfeld setzt sich aus der Gesamtheit der Temperaturen  $\vartheta$  im Raum zusammen (Baehr & Stephan, 2013):

$$\vartheta = \vartheta(x, t) \quad (5)$$

Es wird zwischen stationärem und instationärem Temperaturfeld unterschieden. Wenn ein Temperaturfeld von der Zeit  $t$  unabhängig ist, und nur vom Ort  $x$  abhängt, gilt es als stationäres Temperaturfeld. Hängt ein Temperaturfeld von der Zeit  $t$  ab, bezeichnet man es als instationäres bzw. nicht stationäres Temperaturfeld (Baehr & Stephan, 2013).

Werden alle Punkte eines Körpers, die zur Zeit  $t$  die gleiche Temperatur  $\vartheta$  haben, verbunden, werden Flächen konstanter Temperatur im Raum bzw. Linien konstanter Temperatur in einer Ebene erhalten. Solche Flächen bzw. Linien heißen isotherme Flächen bzw. Linien. Die größte Temperaturveränderung erfolgt normal zu den Isothermen und ist durch den Temperaturgradienten gegeben (Baehr & Stephan, 2013):

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} e_x + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} e_y + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} e_z \quad (6)$$

wobei  $e_x$ ,  $e_y$ , und  $e_z$  die Einheitsvektoren der drei Koordinatenrichtungen darstellen.

Der Gradientenvektor steht senkrecht auf den Isothermen und zeigt in Richtung des stärksten Temperaturanstiegs (Baehr & Stephan, 2013).

## 2.1.4 Wärme

Wärme ist eine Energieform, die durch den Temperaturunterschied zwischen zwei Körpern übertragen wird. Die Maßeinheit für die Energiemenge ist Joule [J] oder Wattsekunde [Ws] (Baehr & Stephan, 2013).

## 2.1.5 Wärmestrom und Wärmestromdichte

Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  gibt an, wie viel Wärme pro Zeiteinheit übertragen wird. Die Maßeinheit für Wärmestrom ist Watt [W] (von Böckh & Wetzel, 2013).

Die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  gibt an, welcher Wärmestrom  $\dot{Q}$  pro Flächeneinheit  $A$  übertragen wird. Ihre Maßeinheit ist Watt pro Quadratmeter [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] (von Böckh & Wetzel, 2013):

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (7)$$

$\dot{q}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestromdichte
$\dot{Q}$	[W]	Wärmestrom
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche

## 2.1.6 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m K})$ ] ist eine Materialeigenschaft. Sie gibt an, wie viel Wärmestrom  $\dot{Q}$  pro Längeneinheit eines Materials  $l$  und pro ein Grad Temperaturdifferenz übertragen wird (von Böckh & Wetzel, 2013):

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist temperatur- und druckabhängig (Baehr & Stephan, 2013):

$$\lambda = \lambda(\vartheta, p) \quad (8)$$

Gute elektrische Leiter (z. B. Metalle) weisen auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit auf. Flüssigkeiten haben eine kleinere Wärmeleitfähigkeit. Gase sind i.A. schlechte Wärmeleiter, und damit haben sie auch eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit (von Böckh & Wetzel, 2013).

## 2.1.7 Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  [W/(m<sup>2</sup> K)] gibt einen Wärmestrom  $\dot{Q}$  an, der pro Flächeneinheit  $A$  und pro Grad Temperaturdifferenz zwischen einem Stoff und einem Fluid (Gas, Flüssigkeit) und umgekehrt übertragen wird (von Böckh & Wetzels, 2013).

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  ist materialabhängig.

## 2.2 Berechnung der Wärmeleitung

### 2.2.1 Wärmetransport

Wärme ist eine Energieform, die durch den Temperaturunterschied zwischen zwei Körpern übertragen wird. Laut dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik fließt Wärme dabei nur in der Richtung fallender Temperatur (Baehr & Stephan, 2013).

Man unterscheidet drei Arten des Wärmetransports:

- Wärmeleitung;
- Konvektion;
- Wärmestrahlung.

Die Wärmeleitung tritt in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen durch die Bewegung der Atome, Moleküle, Elektronen oder Phononen auf. Die Voraussetzung für eine Wärmeleitung ist das Vorhandensein eines Temperaturgradienten in einem Stoff (von Böckh & Wetzels, 2013).

### 2.2.2 Wärmeleitung in einer ebenen Wand

In Abb. 4 wird eine ebene Wand mit der Dicke  $s$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  dargestellt. Sie ist oben und unten thermisch dicht, d. h., die Wärme kann nur in der  $x$  – Richtung transportiert werden. Aus diesem Grund wird diese Wärmeleitung auch eindimensionale Wärmeleitung genannt. Es gilt (von Böckh & Wetzels, 2013):

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \quad (9)$$

In einer ebenen Wand, deren Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  konstant ist, verläuft der Temperaturverlauf linear (siehe Abb. 4) (von Böckh & Wetzel, 2013):

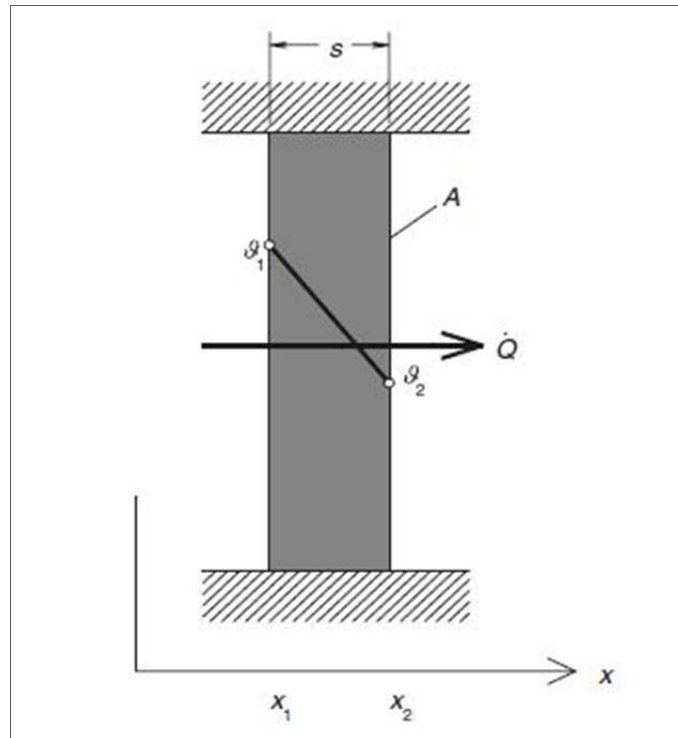
$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (10)$$

$\dot{Q}$	[W]	Wärmestrom
$\lambda$	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
$s$	[m]	Schichtdicke
$\vartheta_1$	[°C]	Temperatur der wärmeren Seite der Wand
$\vartheta_2$	[°C]	Temperatur der kälteren Seite der Wand

In einer ebenen Wand wird die Wärmeübergangszahl  $\alpha$ , die Wärmeleitfähigkeit, durch die Wanddicke geteilt (von Böckh & Wetzel, 2013):

$$\alpha = \frac{\lambda}{s} \quad (11)$$

$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	Wärmeübergangszahl
$\lambda$	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert
$s$	[m]	Schichtdicke



**Abb. 4:** Wärmeleitung in einer ebenen Wand (von Böckh & Wetzel, 2013)

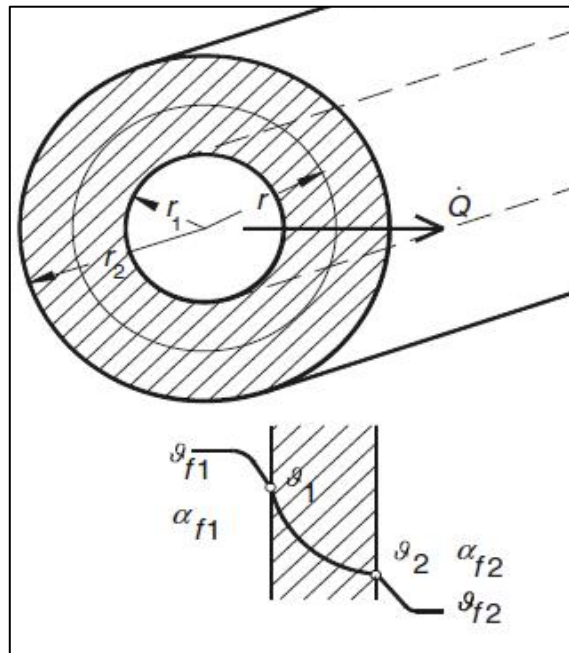
Wenn eine ebene Wand aus zwei Schichten mit den unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  und den unterschiedlichen Schichtdicken  $s_1$  und  $s_2$  besteht, muss der Wärmestrom konstant bleiben. Es gilt:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (12)$$

$$\frac{s_1}{\lambda_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{s_2}{\lambda_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) \quad (13)$$

$\lambda_n$	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte der Schichten
$\vartheta_n$	[°C]	Temperatur an der Schichtgrenze
$s_n$	[m]	Schichtdicke der jeweiligen Schicht

### 2.2.3 Wärmeleitung in einem Hohlzylinder



**Abb. 5:** Wärmeleitung in einem Hohlzylinder (von Böckh & Wetzel, 2013)

Im Unterschied zur Wärmeleitung in einer ebenen Wand, in der die Querschnittsfläche  $A$  konstant ist, ändert sie sich bei der Wärmeleitung in einem Hohlzylinder als eine Funktion vom Radius  $r$  (siehe Abb. 5) (von Böckh & Wetzel, 2013):

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A(r) \cdot \frac{d\vartheta}{dr} = -\lambda \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot l \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \quad (14)$$

Nach Umformung bekommt man:

$$\frac{dr}{r} = \frac{-\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot l}{\dot{Q}} d\vartheta \quad (15)$$

Nach Integration und Umformung der vorherigen Gleichung ist der Wärmestrom:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{2 \cdot l \cdot \pi}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (16)$$



$\dot{Q}$	[W]	Wärmestrom
$\lambda$	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwert
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
$r_1$	[m]	Innenradius
$r_2$	[m]	Außenradius
$l$	[m]	Länge des Zylinders
$\vartheta_1$	[°C]	Temperatur innen
$\vartheta_2$	[°C]	Temperatur außen

Wenn ein Hohlzylinder aus zwei oder mehr Schichten mit den unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$  und den unterschiedlichen Radien  $r_1, r_2, r_3, \dots$  besteht, muss der Wärmestrom ebenfalls konstant bleiben. Somit gilt:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (17)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \lambda_2 \cdot \frac{(\vartheta_2 - \vartheta_3)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \quad (18)$$

$\lambda_n$	[W/m K]	Wärmeleitfähigkeitsbeiwerte der Schichten
$\vartheta_n$	[°C]	Temperatur an der Schichtgrenze
$r_n$	[m]	Radius der Schichtgrenzen

## 2.2.4 Sonstige Wärmeleitungen

Es gibt auch weitere Möglichkeiten zur Berechnung der Wärmeleitung (von Böckh & Wetzel, 2013):

- Wärmeleitung in einer Hohlkugel;
- Wärmeleitung mit seitlichem Wärmetransfer (Rippen).

Diese zwei Möglichkeiten der Wärmeleitungsberechnung werden im Rahmen dieser Masterarbeit jedoch nicht im Detail beleuchtet.

Bei all diesen Wärmeleitungen handelt es sich um stationäre Wärmeleitungen. Wie bereits erwähnt, gibt es auch instationäre Wärmeleitungen, bei denen die Temperatur orts- und zeitabhängig ist. Diese instationären Wärmeleitungen werden im Rahmen dieser Masterarbeit allerdings auch keine Berücksichtigung finden.

## 2.3 Verfüllmaterialien bei Fernwärme

### 2.3.1 Thermosand

#### 2.3.1.1 Geschichte

Beim Abbau von Kohle entsteht ein Abraummateriale. Dieses Abraummateriale besteht größtenteils aus Schluff und Ton, weist aber noch einen 10%-igen Anteil an Kohle auf (Wenigmann, 2011).

Durch die thermische Umwandlung dieses Materials (ein Prozess, der dem Brennen von Ziegeln bei hoher Temperatur gleicht) entsteht ein klinkerähnliches Material, welches heute abgebaut wird (siehe Abb. 6). Aus diesem Material entsteht durch Brechen und Sieben Thermosand. Thermosand findet heute hauptsächlich als Tennissand oder Dämmmaterial Verwendung. (Wenigmann, 2011).



**Abb. 6:** Abbau von Thermosand in der Halde in Fohnsdorf, Steiermark (Wenigmann, 2011)

### 2.3.1.2 Bodenmechanische Eigenschaften

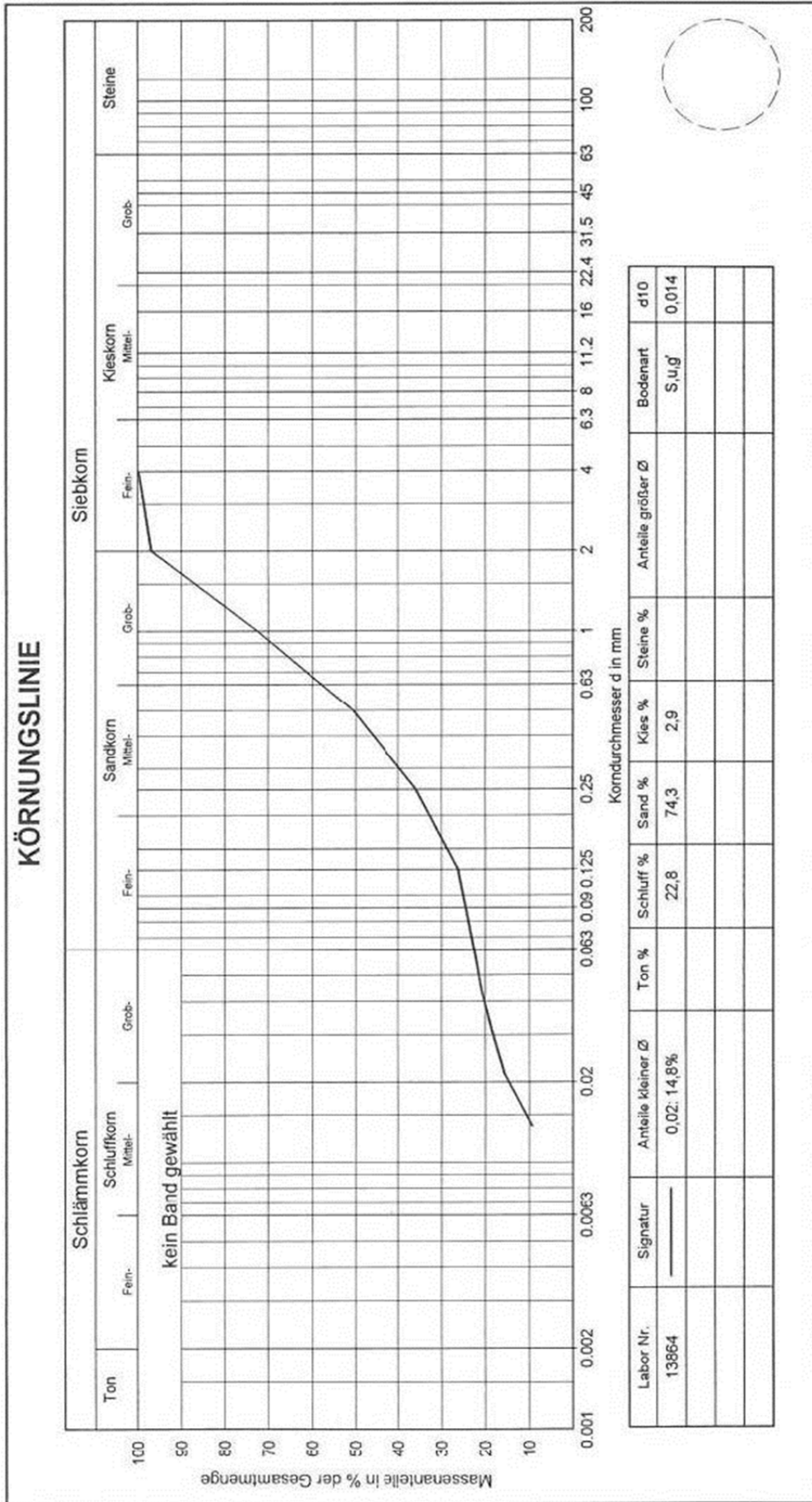
Eine Probe Thermosand wurde im geotechnischen Labor des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz geprüft. Die durchgeführte Materialprüfung zeigte folgende bodenmechanische Eigenschaften (Semprich & Henögl, 2003):

Der untersuchte Thermosand weist eine Korndichte von  $\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$  auf.

Laut der Siebanalyse (siehe Abb. 7) hat der Thermosand eine Korngrößenverteilung mit einem Ton- und Schluffanteil ( $d < 0,063 \text{ mm}$ ) von 22,8 M-%, einem Sandanteil ( $0,063 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$ ) von 74,3 M-% und einem Kiesanteil ( $2 \text{ mm} < d < 4 \text{ mm}$ ) von 2,9 M-%. Das Größtkorn hat einen Durchmesser von 4 mm.

Bodenmechanisch bezeichnet man Thermosand als gering kiesig, schluffigen Sand.

Der wirksame Korndurchmesser  $d_{10}$  beträgt 0,014 mm.



**Abb. 7:** Siebanalyse des Thermoandes laut ÖNORM B4412 (Semprich & Henögl, 2003)

Die Ungleichförmigkeitszahl  $C_u$  beträgt 47.

Um das Verdichtungsverhalten des Thermosandes zu prüfen, wurde der Proctorversuch laut ÖNORM 4418 anhand von 5 Proben mit unterschiedlichen Wassergehalten ( $w = 21,3 \%$ ,  $22,7 \%$ ,  $23,9 \%$ ,  $25,3 \%$  und  $28,2 \%$ ) und den zugehörigen Sättigungsgraden ( $S_r = 61, 67, 72, 77$  und  $84 \%$ ) durchgeführt. Die Proctorkurve ist in Abb. 8 dargestellt.

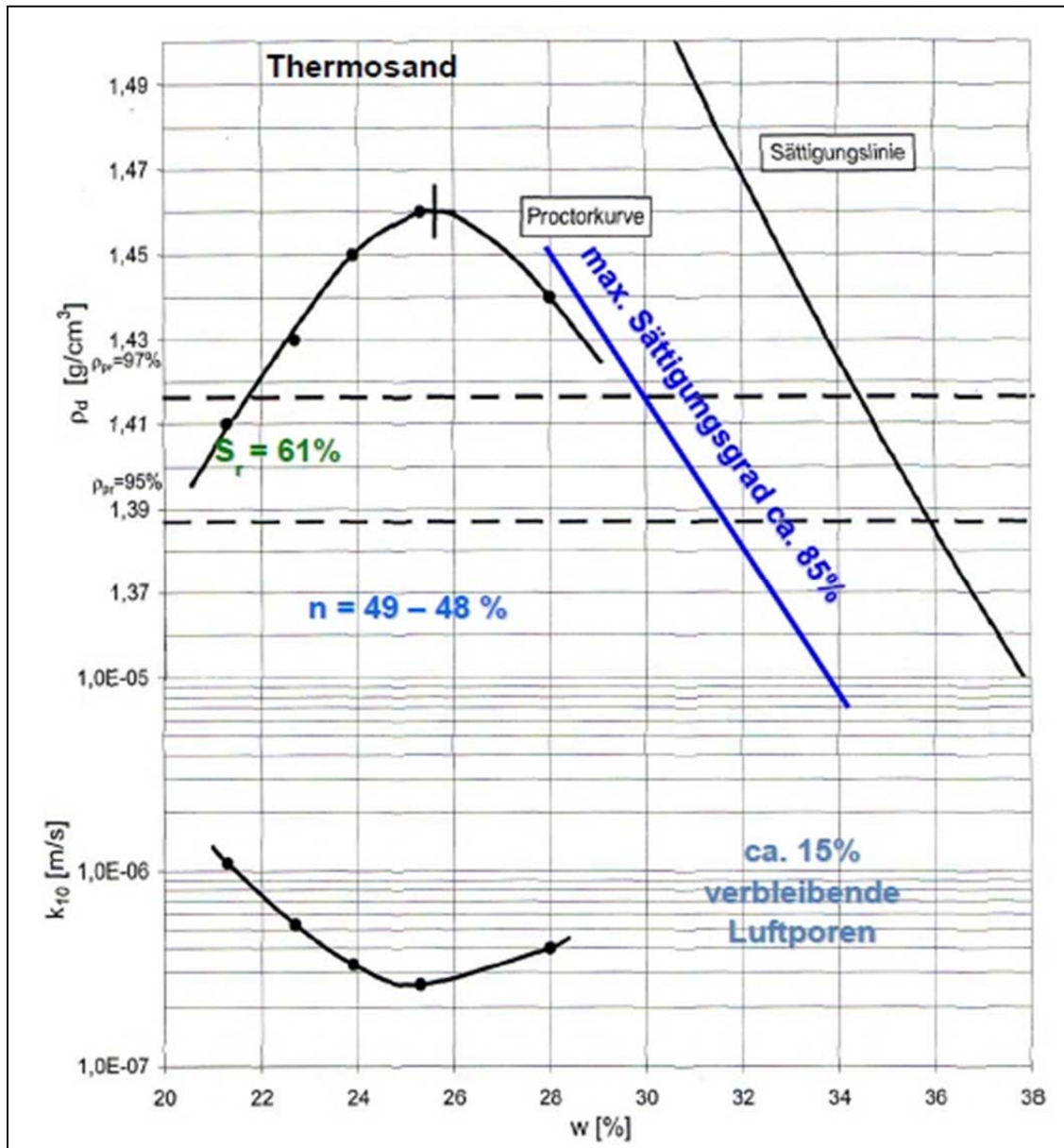
Der optimale Wassergehalt ist  $w_{opt} = 25,6 \%$ .

Die Proctordichte beträgt  $\rho_{Pr} = 1,46 \text{ g/cm}^3$ .

Der zugehörige Porenanteil  $n$  schwankt zwischen  $n = 48 \%$  und  $n = 49 \%$ .

Die Durchlässigkeit  $k_{10}$  wurde laut ÖNORM B4422-1 an Zylinderproben mit einem Durchmesser  $d = 10 \text{ cm}$  und einer Höhe  $H = 12 \text{ cm}$  bei einem hydraulischen Gefälle von  $i = 30$  bestimmt. Einbaudichte und Wassergehalt sind gleich wie im Proctorversuch. Die mittlere Durchlässigkeit beträgt:  $k_{10} = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  (siehe Abb. 8).

Der effektive Reibungswinkel  $\varphi'$  und die effektive Kohäsion  $c'$  wurden durch konsolidierte, drainierte Rahmenscherversuche in Scherbüchsen mit einer Probenabmessung von  $10 \times 10 \times 2 \text{ cm}$  bei konstanter Schergeschwindigkeit von  $0,013 \text{ mm/min}$  und einer Normalspannungen von  $\sigma_n = 5, 10$  und  $15 \text{ N/cm}^2$  bestimmt.

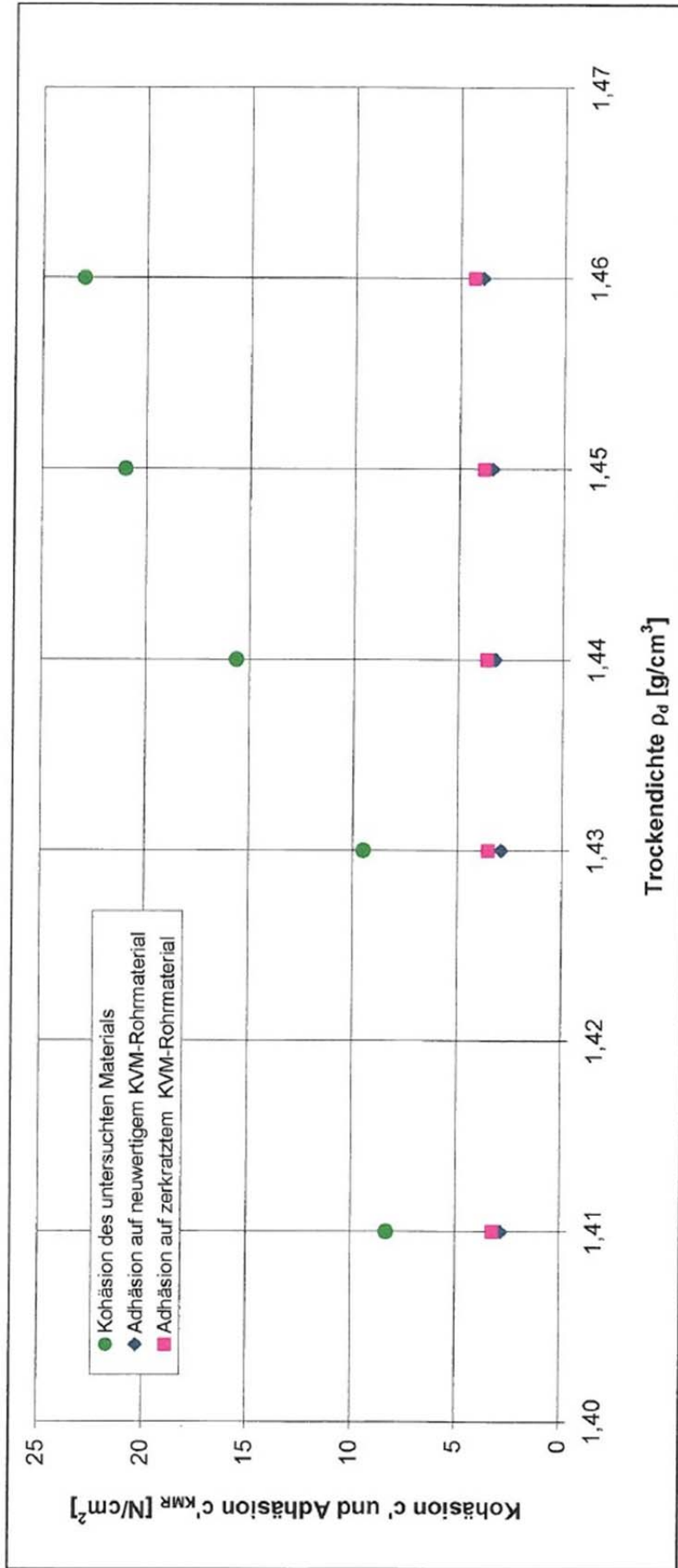


**Abb. 8:** Proctorkurve und Durchlässigkeitsbeiwerte des Therмосands laut ÖNORM 4418 (Henögl, 2006)

Die im Scherversuch ermittelte effektive Kohäsion  $c'$  liegt zwischen  $8,3 \text{ N/cm}^2$  bei einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,41 \text{ g/cm}^3$  und  $23,0 \text{ N/cm}^2$  bei einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,46 \text{ g/cm}^3$  (siehe Abb. 9). Die mittlere effektive Kohäsion beträgt  $c'_{\text{mittel}} = 15,5 \text{ N/cm}^2$ .

Der minimale effektive Reibungswinkel beträgt  $\varphi'_{\text{min}} = 34,5^\circ$  bei einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,41 \text{ g/cm}^3$  (siehe Abb. 10). Einer Trockendichte von  $\rho_d = 1,46 \text{ g/cm}^3$  entspricht der maximale effektive Reibungswinkel von  $\varphi'_{\text{max}} = 44,9^\circ$  (siehe Abb. 10). Der mittlere effektive Reibungswinkel beträgt also  $\varphi'_{\text{mittel}} = 38,2^\circ$ .

Der Restscherwinkel  $\varphi_r$  liegt zwischen  $30,8^\circ$  und  $36,0^\circ$ , im Mittel bei  $34,0^\circ$ .



**Abb. 9:** Kohäsion  $c'$  und Adhäsion  $c'_{KMR}$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_d$  (Semprich & Henögl, 2003)

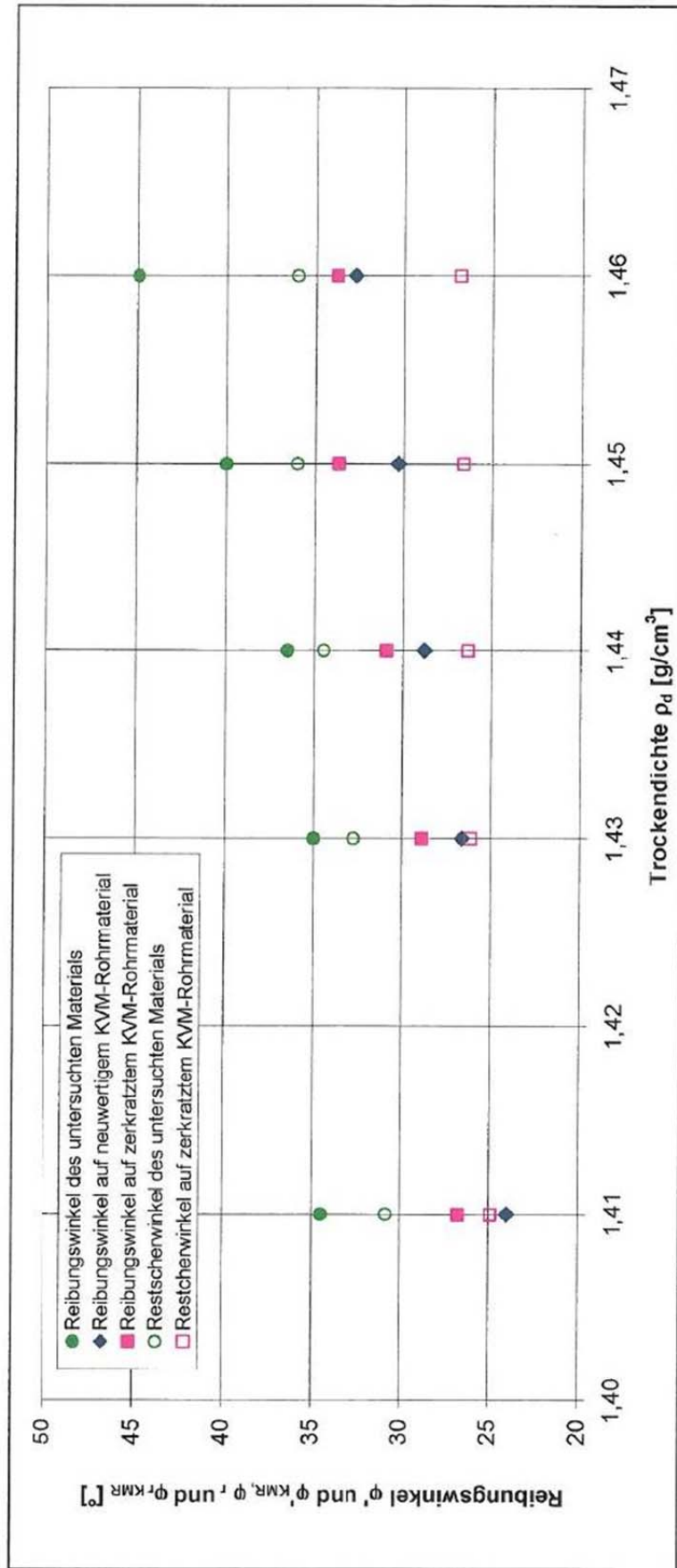


Abb. 10: Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_d$  (Semprich & Henögl, 2003)



In Abb. 9 und Abb. 10 wurden auch der Reibungswinkel und die Adhäsion zwischen Thermosand und dem glatten bzw. zerkratzten Mantel des KVM-Rohres dargestellt. Eine übersichtliche Gegenüberstellung dieser Werte lässt sich der folgenden Tabelle entnehmen:

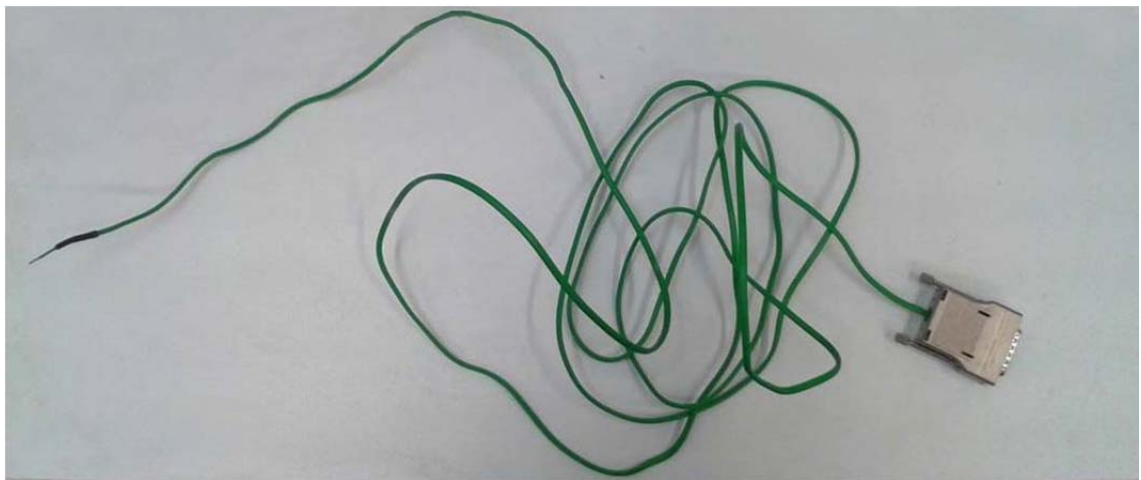
**Tab. 1:** Gegenüberstellung der Werte für Reibungswinkel und Adhäsion zwischen Thermosand und Mantel des KVM-Rohres

<b>KVM-Rohrmaterial</b>	<b>Reibungswinkel <math>\varphi'_{\text{KMR}}</math> [°]</b>	<b>Adhäsion <math>c'_{\text{KMR}}</math> [N/cm<sup>2</sup>]</b>
<b>neuwertig</b>	24 - 32,7	2,8 - 3,9
<b>zerkratzt</b>	26,7 - 33,8	3,2 - 4,3

## 3 Messeinrichtung

In diesem Kapitel werden die Messeinrichtungen, die im Laborgroßversuch verwenden wurden, im Detail beschrieben. Es wurden vor allem Temperatur- und Wassergehaltsmessungen vorgenommen.

### 3.1 Alte Temperaturmesseinrichtung



**Abb. 11:** Thermoelement des Typs K (02.04.2014)

Diese alte Messeinrichtung besteht aus den Thermoelementen des Typs K (siehe Abb. 11), einer Datenspeichereinheit Spider 8 (siehe Abb. 12) und der Aufzeichnungssoftware „Catman“ von HBM, die die Datenspeichereinheit Spider 8 unterstützt.



**Abb. 12:** Datenspeichereinheit Spider 8 (02.04.2014)

Die Thermoelemente des Typs K messen elektrische Spannung in Volt [V]. Diese elektrische Spannung ist temperaturabhängig. Nach der Messung werden die elektrischen Spannungen in Temperaturen umgerechnet (siehe Unterkapitel 3.1.1).

Die Thermoelemente bestehen aus zwei elektrischen metallischen Leitern, die am Ende miteinander verbunden sind. Genau an dieser Stelle entsteht elektrische Spannung. Diese Spannung wird mit Hilfe der Datenerfassungseinheit Spider 8 gemessen und gespeichert.

Mit den Thermoelementen des Typs K können Temperaturen von  $-270\text{ °C}$  bis  $1372\text{ °C}$  gemessen werden. Die zugehörigen elektrischen Spannungen liegen im Bereich von etwa  $6458\text{ }\mu\text{V}$  (entspricht einer Temperatur von  $-270\text{ °C}$ ) bis  $54886\text{ }\mu\text{V}$  (entspricht einer Temperatur von  $1372\text{ °C}$ ). Ihre Messgenauigkeit beträgt  $\pm 1,5\text{ °C}$  (Wenigmann, 2011).

### 3.1.1 Kalibrierung der Thermoelemente



**Abb. 13:** Temperature Calibrator D55SE (03.04.2014)

Um eine größere Genauigkeit als  $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  zu erreichen, sollten die Thermoelemente kalibriert werden. Dies erfolgte im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit Hilfe des Temperaturkalibrators D55SE (siehe Abb. 13).

Die Thermoelemente wurden am 2. und 3. April 2014 bei den Temperaturen 20, 50 und 70  $^\circ\text{C}$  im Labor des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz kalibriert.

Jedes Thermoelement wurde separat kalibriert. Aus diesem Grund wurde jedes Thermoelement auch unterschiedlich bezeichnet:

1. T0/CH4
2. T1/CH5
3. T2/CH6
4. T3CH7
5. T4/CH14
6. T5/CH15
7. T7/CH17

T0, T1, T2 etc. bezeichnen die Nummer des Thermoelements. CH4, CH5, CH6 etc. sind die Kanalnummern. Diese Kanalnummern bezeichnen die Anschlüsse auf der Datenspeichereinheit Spider 8, an denen die Thermoelemente angeschlossen wurden.

Der Temperaturkalibrator hat eine Temperaturkammer (siehe Abb. 13), in der er die eingestellte Temperatur mit großer Genauigkeit konstant hält. Nachdem die Temperatur erreicht ist, misst man die zugehörige Spannung. Diesen Vorgang muss man jeweils für die Temperaturen 20, 50, und 70  $^\circ\text{C}$  wiederholen. Die Software speichert die elektrischen Spannungen für diese Temperaturen. Wenn die Spannungen für diese Temperaturen bekannt sind, werden sie automatisch weiter interpoliert. Mit Hilfe dieser Daten kann man dann alle anderen Temperaturen messen.

Danach wird der Sollwert mit dem Istwert verglichen, um zu überprüfen, ob die Temperaturkalibrierung erfolgreich war. Dazu misst man mit den Thermoelementen die schon bekannte Temperatur einer Flüssigkeit (z. B. Wasser) (siehe Abb. 14). Wenn die Abweichung kleiner als  $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ist, war die Temperaturka-



Zunächst wurde diese Messeinrichtung eingerichtet und kalibriert. Nach Rücksprache mit dem Hersteller, der Messtechnikfirma HBM, musste allerdings festgestellt werden, dass die Datenspeichereinheit Spider 8 zu alt ist und im Fall einer Gerätstörung nicht repariert werden kann. Aus diesem Grund wurde eine neue Messeinrichtung bestellt und eingerichtet (siehe Unterkapitel 3.2).

### 3.2 Neue Temperaturmesseinrichtung



**Abb. 15:** QuantumX MX1609 Messverstärker mit den Thermoelementen des Typs K

Die neue Temperaturmesseinrichtung besteht ebenfalls aus den Thermoelementen des Typs K, jedoch mit einem modifizierten Stecker (Ministecker), weiters aus einem Messverstärker QuantumX MX1609 und einer neuen Version der Aufzeichnungssoftware „CATMAN“, die auch von HBM hergestellt wird (siehe Abb. 15).

Vorteil dieser neuen Temperaturmesseinrichtung gegenüber der alten ist, dass man in QuantumX MX1609 16 Thermoelemente gleichzeitig einstecken kann. Dieser Messverstärker wird auch von der neuen Software unterstützt, wodurch er zahlreiche bessere Möglichkeiten für komplizierte Messungen bietet.

Die Messung erfolgt gleich wie bei der alten Temperaturmesseinrichtung (siehe Kapitel 3.1).

### 3.3 Wassergehaltsmessung

Die Wassergehaltsmessung des Bettungsmaterials wird mit Hilfe von TDR-Sonden (Time-Domain-Reflectometrie) durchgeführt (siehe Abb. 16).



**Abb. 16:** TDR-Zweistabsonde LP/ms (12.05.2014)

Die Bestimmung des Wassergehalts der Böden mit Hilfe der TDR-Sonden ist ein alternatives Verfahren zur Ofentrocknung der Böden. Größter Vorteil dieses Verfahrens im Vergleich zur Ofentrocknung ist, dass der Wassergehalt wesentlich schneller und direkt vor Ort (in situ) bestimmt werden kann.

#### 3.3.1 Prinzip der TDR-Technik

Das Prinzip der TDR-Methode wurde auf der FARADAY-Grundlage aufgebaut, dass auch ein Nichtleiter einen Einfluss auf das elektrische Feld hat. Faraday hat verschiedene Nichtleiter im Vakuum zwischen die Platten eines geladenen Kondensators geführt und die Änderung der Kapazität des Kondensators  $C$  gemessen (Scheid, 2000). Er hat festgestellt, dass sich die Kapazität des Kondensators  $C$  im Vergleich zur Kapazität im Vakuum  $C_0$  um den Faktor  $\varepsilon$  verändert. Der Faktor  $\varepsilon$  ist ein durch Messung erhaltener Materialkennwert, der als Dielektrizitätskonstante bezeichnet wird (Scheid, 2000).



Die Wasserdipole werden in einem elektrischen Feld in entgegengesetzter Richtung angeordnet (Scheid, 2000). Wasser hat auch im Vergleich zu anderen Nichtleitern eine deutlich höhere Dielektrizitätskonstante. Auf diesem Prinzip beruht die Wassergehaltsbestimmung mit den TDR-Sonden (Scheid, 2000).

Bei der TDR-Technik werden die Ausbreitungsgeschwindigkeit und das Verhalten einer elektromagnetischen Welle in einem Medium untersucht. Danach wird diese Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle in einem Medium der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle im Vakuum gegenübergestellt (Scheid, 2000):

Die Dielektrizitätskonstante eines Mediums, in dem sich ein elektromagnetisches Feld ausbildet, beeinflusst dessen Ausbreitung. Abgeleitet aus der Maxwellschen Lichttheorie (Maxwell, 1873) gilt vereinfacht für die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  einer elektromagnetischen Welle in einem beliebigen Material (Rost, 1978):

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (19)$$

$c$	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium
$c_0$	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum
$\varepsilon$	[-]	relative Dielektrizitätskonstante

Um diese Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes im Boden verwenden zu können, darf sich das Messsignal nur an der zu messenden Stelle im umgebenden Boden ausbreiten (Stacheder, 1996, Topp et al., 1980). Zu diesem Zweck werden Stabsonden mit einem abgeschirmten Koaxialleiter verwendet. Den Messbereich bilden zwei parallele Stäbe aus Edelstahl mit bekannter Länge, die in den Boden eingebettet werden (Wenigmann, 2011).

Aus dem Unterschied der gemessenen Dielektrizitätskonstanten ( $\varepsilon \sim 81$  für Wasser;  $\varepsilon \sim 3,5$  für Böden;  $\varepsilon \sim 1$  für Luft) wird der volumetrische Wassergehalt berechnet (Wenigmann, 2011). Dieser volumetrische Wassergehalt muss in gravimetrischen Wassergehalt umgerechnet werden (siehe Unterkapitel 2.1.1.1).

### 3.3.2 Kalibrierung der TDR-Sonden

Die Messung des Wassergehalts im Laborgroßversuch erfolgt mittels Zweistabsonden LP/mps (siehe Abb. 16) und einer PC-gesteuerten Datenerfassungseinheit LOM/8/mps mit einer zugehörigen Software (siehe Abb. 17) (Malicki & Skierucha, 1989), die von der Fa. EASY TEST, aus Berlin, hergestellt wird.



**Abb. 17:** PC-gesteuerte Datenerfassungseinheit LOM/8/mps (12.05.2014)

Die Sonden bestehen aus zwei parallelen Sondenstäben, die aus rostfreiem Stahl gefertigt sind. Ihr Durchmesser beträgt 0,8 mm und ihre Länge 75 mm. Der Achsenabstand zwischen den Stäben beträgt 5 mm (Wenigmann, 2011).

Die Messungen, die für diese Arbeit benötigt wurden, wurden in einem Intervall von jeweils 10 Minuten durchgeführt und anschließend wurden sämtliche Messwerte mit Hilfe einer Software gespeichert.

Die Genauigkeit des gemessenen volumetrischen Wassergehalts liegt bei mindestens  $\pm 2\%$ , was einem absoluten Fehler bei der Messung der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  von  $\pm 1$  für den Bereich  $2 \leq \epsilon \leq 6$  und  $\pm 2$  für den Bereich von  $\epsilon > 6$  entspricht (Handbuch des Herstellers).

Die materialspezifische Kalibrierung der TDR-Sonden wurde auf den zylindrischen Bodenproben aus Thermosand durchgeführt (siehe Abb. 18). Grundsätzlich erfolgt diese Kalibrierung durch Vergleich der Messungen der TDR-Sonden mit den Ergebnissen der Ofentrocknung.



**Abb. 18:** Zylindrische Bodenprobe – Thermosand (06.05.2014)

Da die Trockendichte des Thermosands, die im Laborgroßversuch eingebaut wird, unbekannt ist, wurden die Wassergehaltsmessungen auf den drei unterschiedlichen Trockendichten durchgeführt. Diese Trockendichten betragen  $1,25 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,40 \text{ g/cm}^3$  und  $1,55 \text{ g/cm}^3$ . Nachdem die Messergebnisse für diese drei Trockendichten bekannt sind, ist es möglich durch die lineare Interpolation den Wassergehalt aller Trockendichten zwischen  $1,25 \text{ g/cm}^3$  und  $1,55 \text{ g/cm}^3$  zu ermitteln. Es wurden auch zusätzlich Messungen für die Trockendichte von  $1,35 \text{ g/cm}^3$  durchgeführt.

Für jede Trockendichte wurden Probenserien mit dem Wassergehalt von 5 %, 15 % und 25 % hergestellt und geprüft.

Für den Laborgroßversuch wurden 8 TDR-Sonden verwendet. Um alle 8 TDR-Sonden bei der Kalibrierung verwenden zu können, dabei aber genügend Ab-

stand zwischen den Sonden untereinander und zwischen den Sonden und dem Zylinder selbst zu halten (Wenigmann, 2011), wurden je Wassergehalt 3 Proben hergestellt. D. h., in jeden Zylinder wurden maximal 3 Sonden eingebaut.

Proben mit dem Durchmesser  $d = 10$  cm und der Höhe  $h = 12$  cm wurden in den Ausstechzylindern hergestellt. In der folgenden Tabelle sind Trockenmassen, Feuchtmassen und Massen des Wassers für alle Trockendichten und Wassergehalte übersichtlich dargestellt:

**Tab. 3:** Massenverteilung der Bodenproben

Trockendichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Wassergehalt $w$ [%]	Trockenmasse $m_d$ [g]	Masse des Wassers $m_w$ [g]	Feuchtmasse $m$ [g]
<b>1,25</b>	5	1178,10	58,90	1237,00
	15		176,71	1354,80
	25		294,52	1472,60
<b>1,35</b>	5	1272,30	63,62	1336,00
	15		190,85	1463,20
	25		318,09	1590,40
<b>1,40</b>	5	1319,50	65,97	1385,4
	15		197,92	1517,4
	25		329,87	1649,3
<b>1,55</b>	5	1460,80	73,04	1533,90
	15		219,13	1680,00
	25		365,21	1826,10

Die gewünschte Trockenmasse  $m_d$  wurde mit der erforderlichen Masse des Wassers  $m_w$  vermischt und mit Hilfe einer hydraulischen Presse in 4 Lagen in einen Ausstechzylinder eingebaut und auf das erforderliche Volumen verdichtet (siehe Abb. 19).



**Abb. 19:** Einpressen mittels einer hydraulischen Presse (06.05.2014)

Nachdem die Proben hergestellt wurden, wurden mit Hilfe eines Bohrers Löcher in die Proben gebohrt. Diese Löcher wurden anschließend mit den Sonden versehen.

Schließlich wurde die Wassergehaltsmessung eine Stunde lang alle 10 Minuten auf den drei Zylinderproben durchgeführt (siehe Abb. 20).



**Abb. 20:** Wassergehaltsmessung mittels TDR-Sonden in den Probenzylindern (28.05.2014)

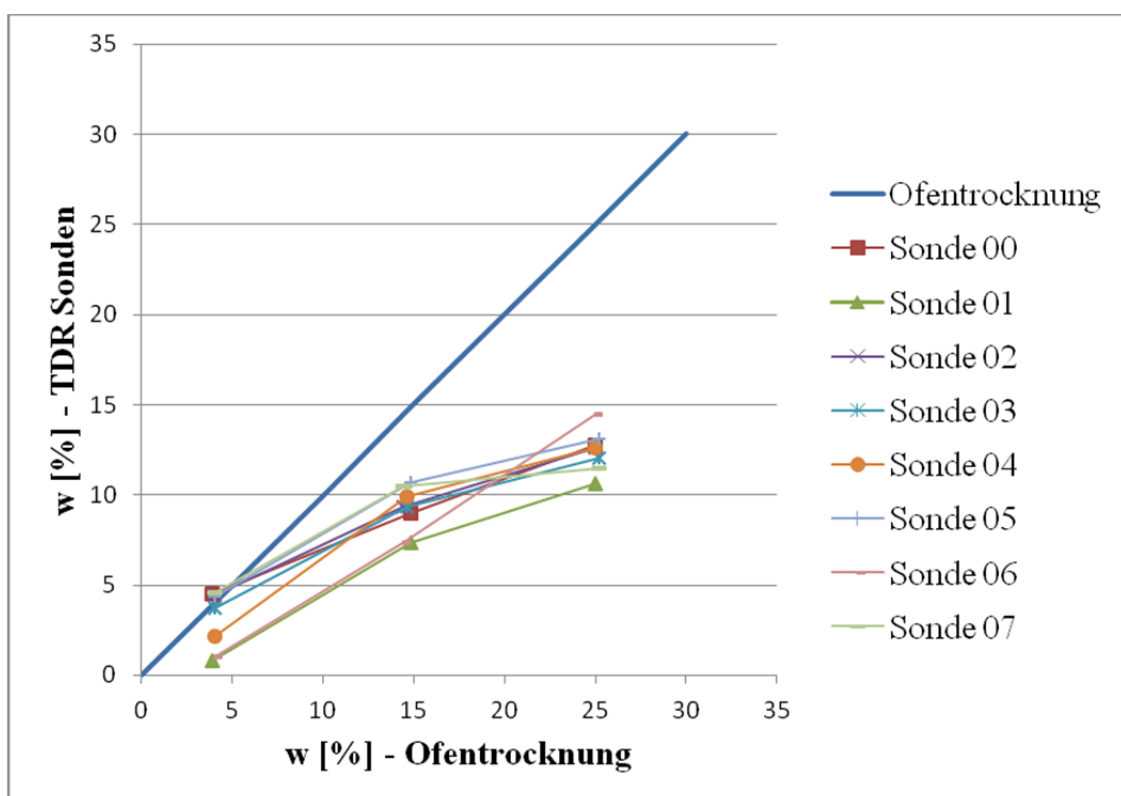
Nach Beendigung der TDR-Messung wurde das Material mit Hilfe der hydraulischen Presse aus den Zylindern ausgepresst, gewogen und im Trockenofen bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nachdem das Material getrocknet war, wurde es erneut gewogen und durch das Verhältnis der Masse des Wassers und der Trockenmasse wurde der gravimetrische Wassergehalt bestimmt (Wenigmann, 2011).

### 3.3.2.1 Kalibrierungsergebnisse

Nachdem die TDR-Messung abgeschlossen wurde, wurden die gemessenen volumetrischen Wassergehalte in gravimetrische Wassergehalte umgerechnet (siehe Unterkapitel 2.1.1.1). Danach wurden Mittelwerte für jede Sonde gebildet, und diese wurden dann mit den Ergebnissen der Ofentrocknung verglichen (siehe Abb. 21, Abb. 23 und Abb. 25).

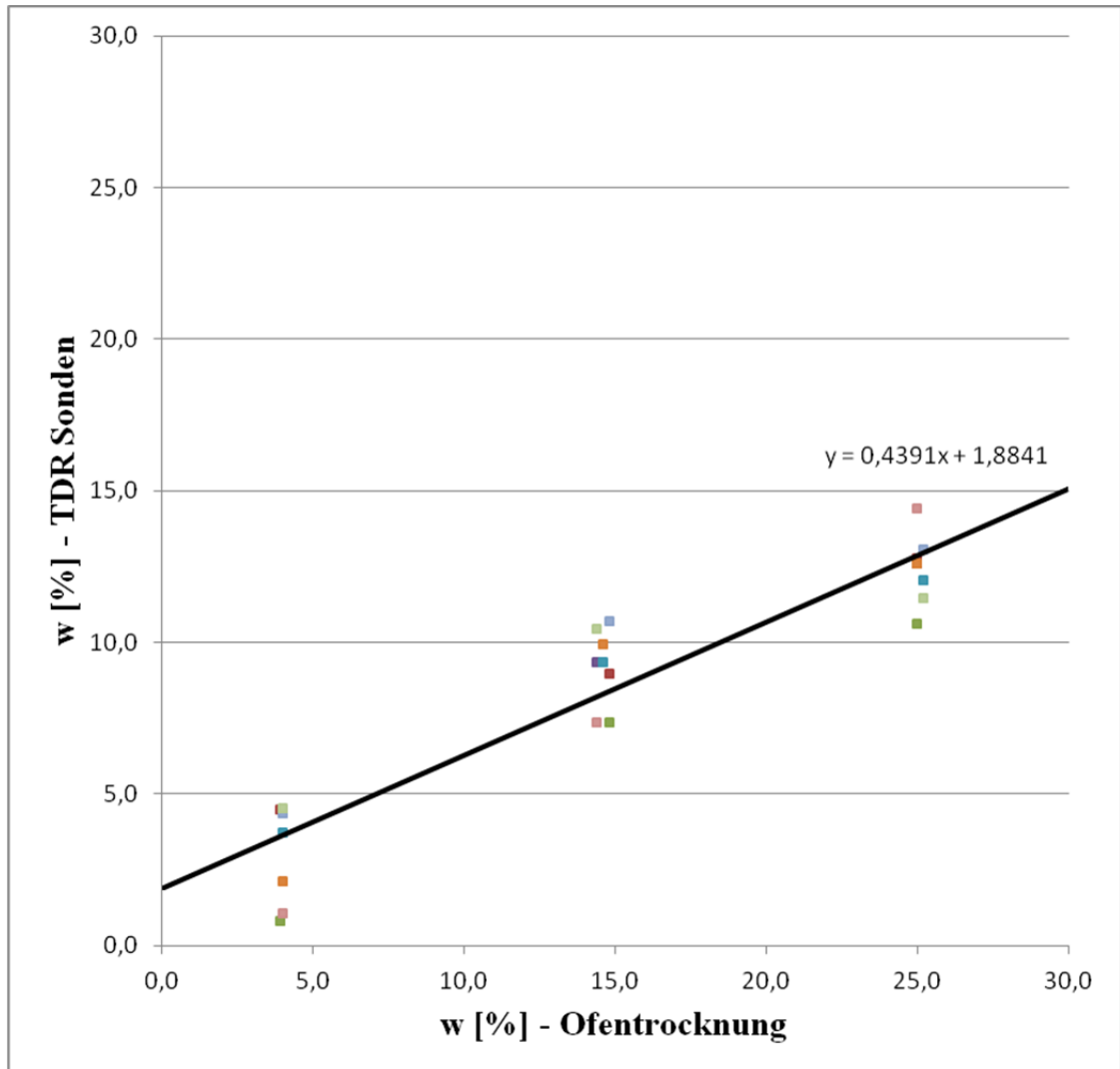
Aus den Abb. 21, Abb. 23 und Abb. 25 ist ersichtlich, dass die TDR-Messung der höheren Wassergehalte (15 % und 25 %) deutlich zu niedrige Ergebnisse ergeben hat. Diese Abweichung rührt von der mineralogischen Zusammensetzung des Thermosands (Wenigmann, 2011). Dies entspricht den Beobachtungen, dass bei höherem Tongehalt der Böden mit der TDR-Methode ein zu geringer Wassergehalt gemessen wird (Topp et al., 1989).

- **Auswertung für die Trockendichte  $\rho_d = 1,25 \text{ g/cm}^3$**



**Abb. 21:** Gegenüberstellung der TDR-Messung und der Ofentrocknung für  $\rho_d = 1,25 \text{ g/cm}^3$

Danach wurden Mittelwerte von sämtlichen Sonden gebildet und es wurde eine Ausgleichsgerade erstellt (siehe Abb. 22, Abb. 24 und Abb. 26):



**Abb. 22:** Ausgleichsgerade für die  $\rho_d = 1,25 \text{ g/cm}^3$

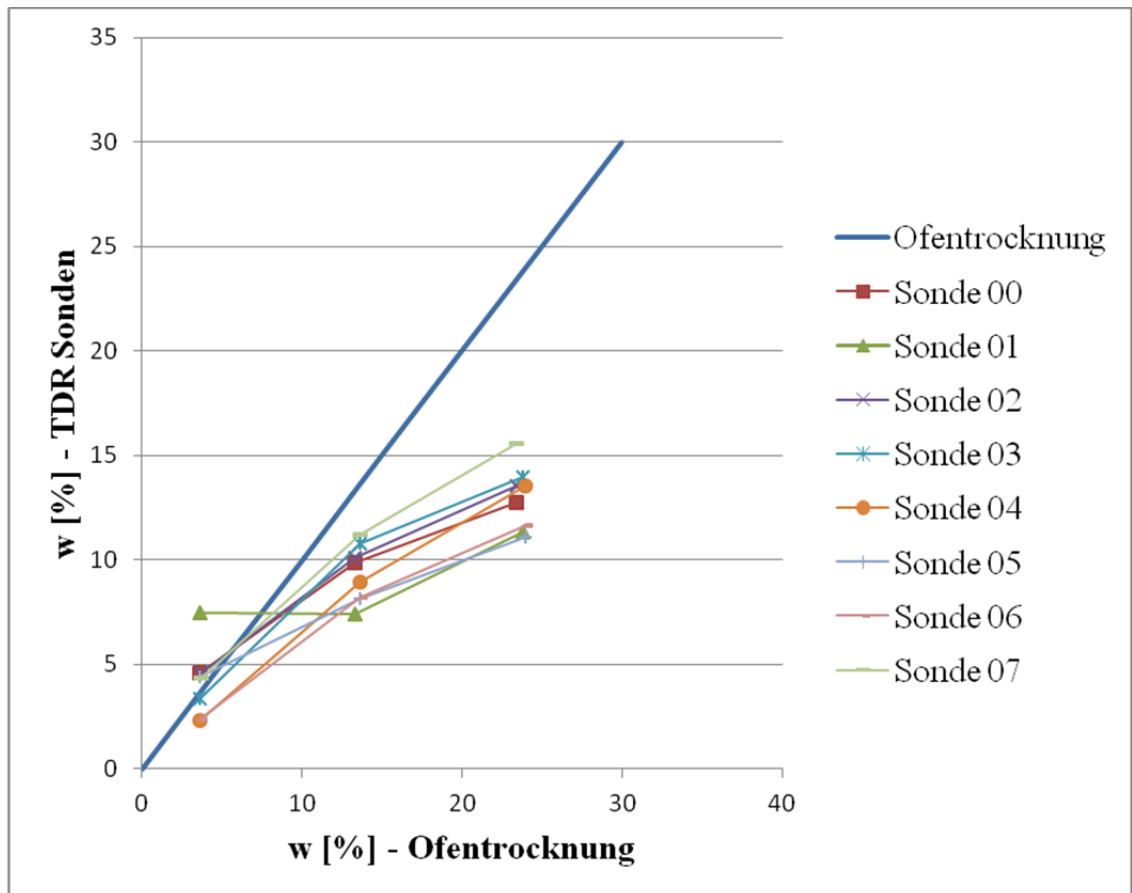
Aus der Gleichung der Ausgleichsgerade folgt der Korrekturfaktor für die Trockendichte  $\rho_d = 1,25 \text{ g/cm}^3$ :

$$w_{TS} = \frac{w_{TDR} - 1,8841}{0,4391} \quad (20)$$

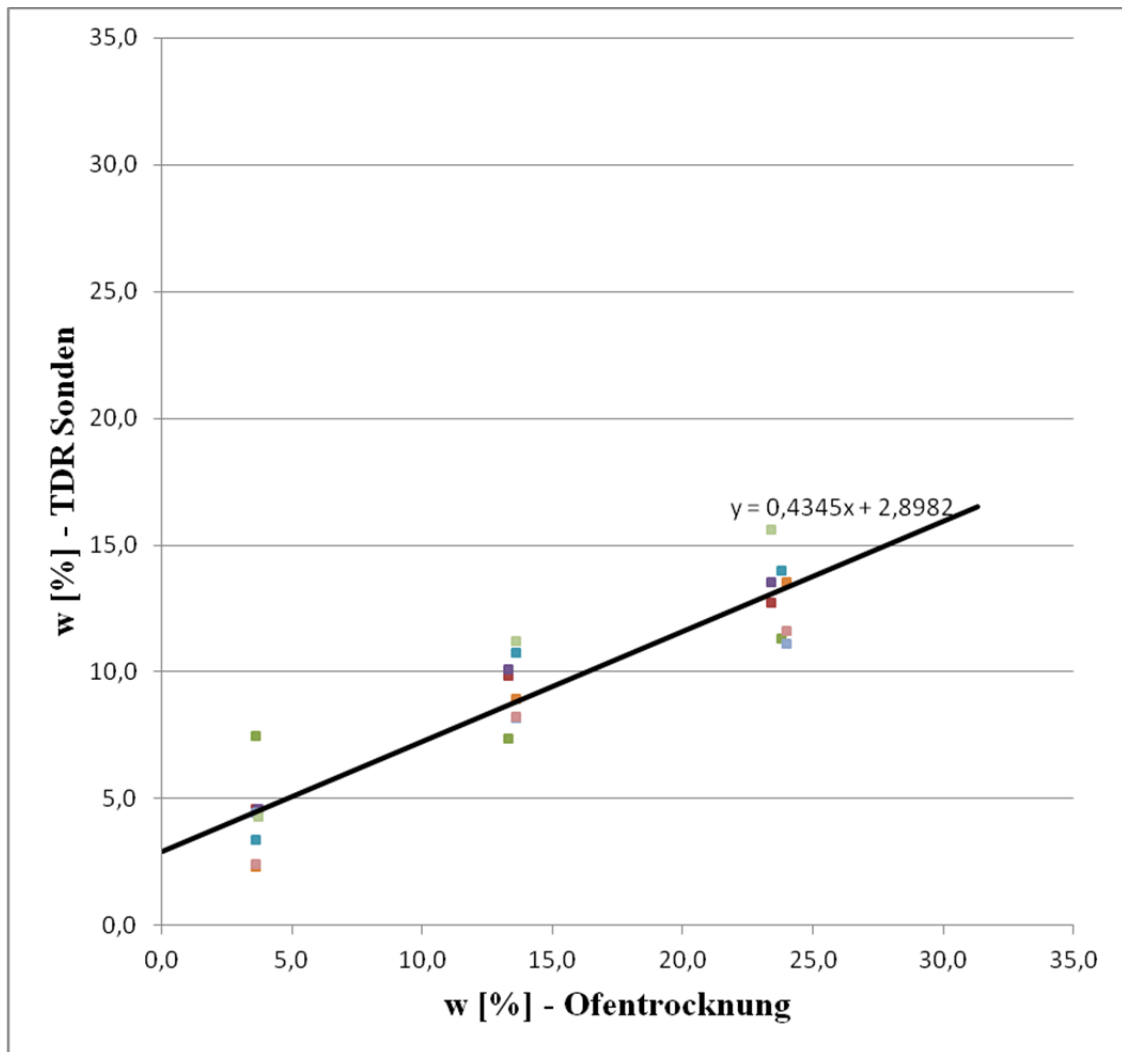
$w_{TS}$  [%]      tatsächlicher gravimetrischer Wassergehalt  
 $w_{TDR}$  [%]      gravimetrischer Wassergehalt aus der TDR-Messung



- Auswertung für die Trockendichte  $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$



**Abb. 23:** Gegenüberstellung der TDR-Messung und der Ofentrocknung für  $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$



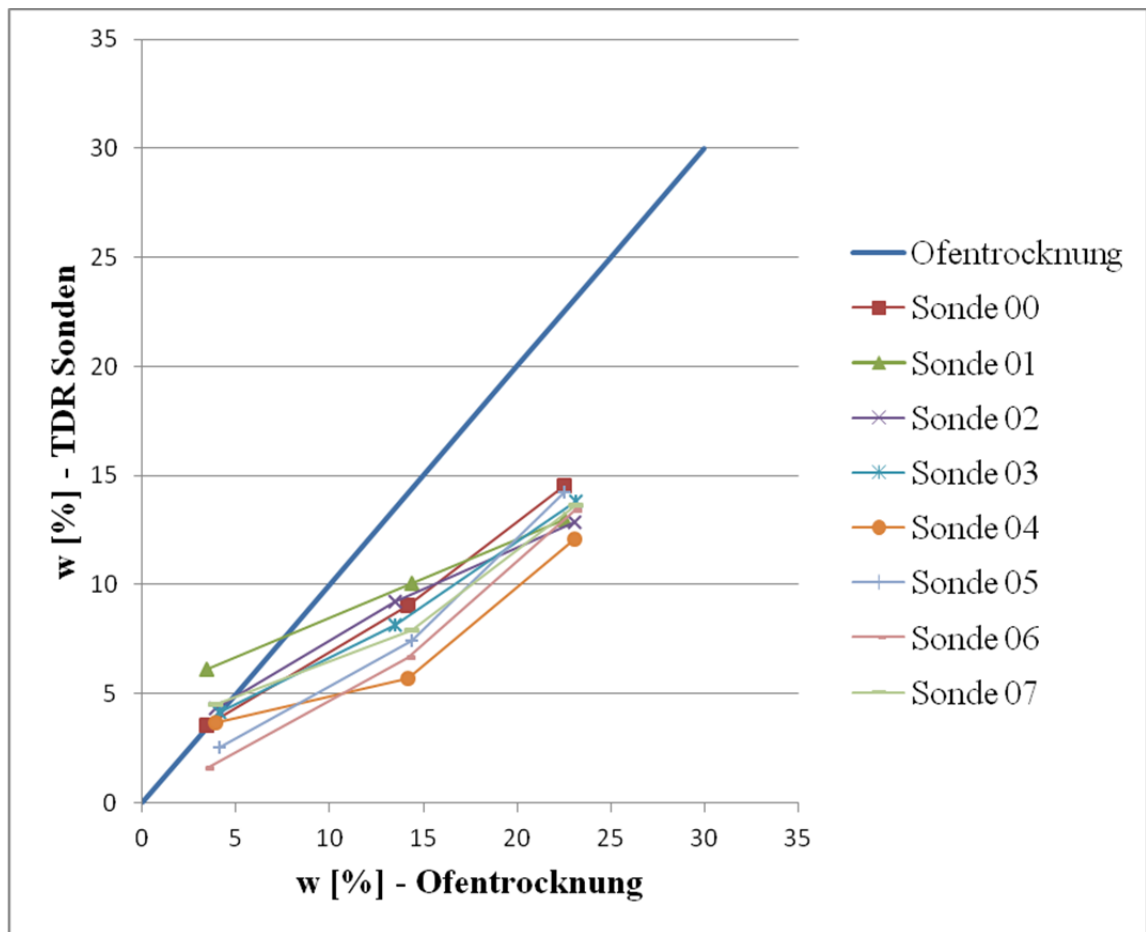
**Abb. 24:** Ausgleichsgerade für die  $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$

Aus der Gleichung der Ausgleichsgerade folgt der Korrekturfaktor für die Trockendichte  $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$ :

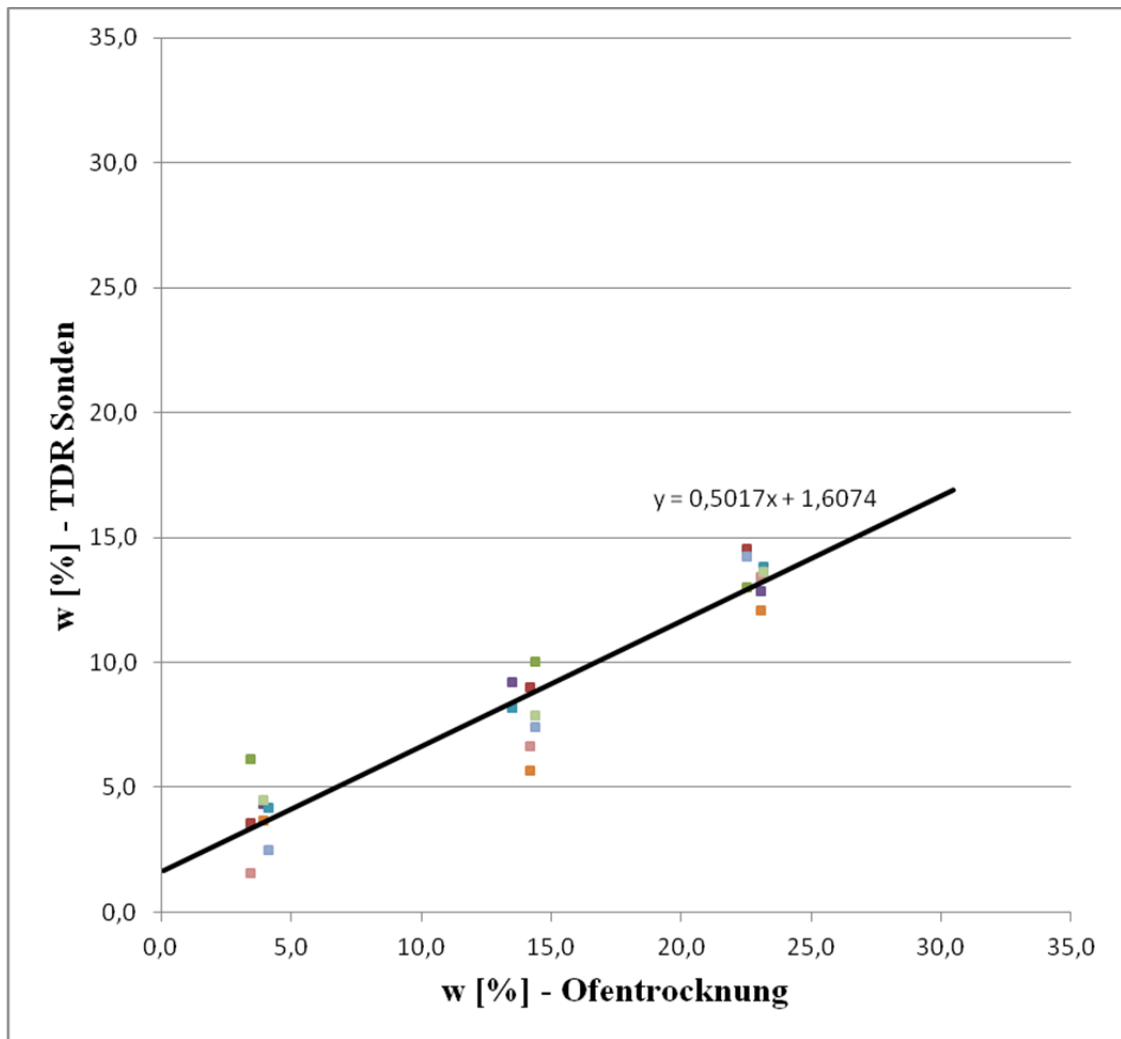
$$w_{TS} = \frac{w_{TDR} - 2,8982}{0,4345} \quad (21)$$

$w_{TS}$	[%]	tatsächlicher gravimetrischer Wassergehalt
$w_{TDR}$	[%]	gravimetrischer Wassergehalt aus der TDR-Messung

- Auswertung für die Trockendichte  $\rho_d = 1,55 \text{ g/cm}^3$



**Abb. 25:** Gegenüberstellung der TDR-Messung und der Ofentrocknung für  $\rho_d = 1,55 \text{ g/cm}^3$



**Abb. 26:** Ausgleichsgerade für die  $\rho_d = 1,55 \text{ g/cm}^3$

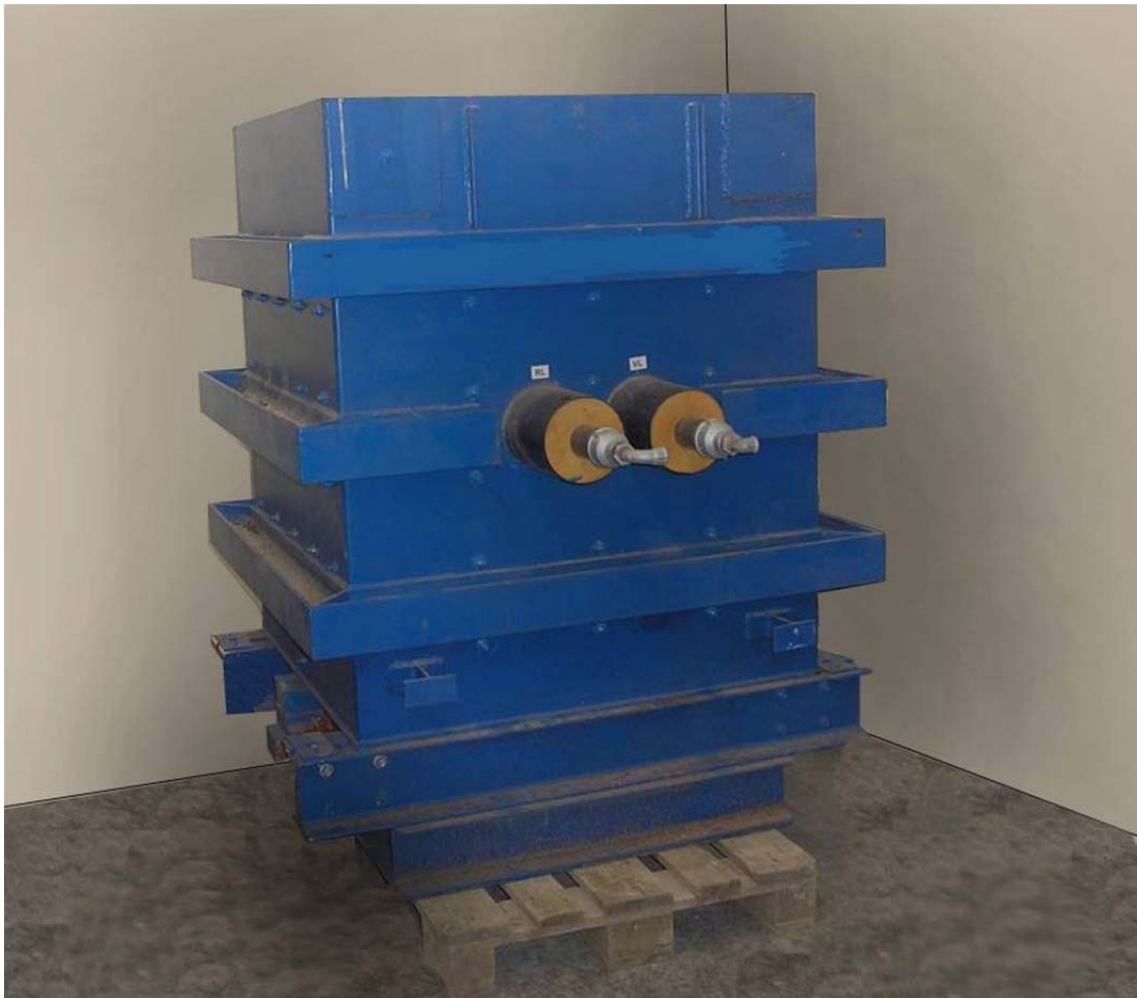
Aus der Gleichung der Ausgleichsgerade folgt der Korrekturfaktor für die Trockendichte  $\rho_d = 1,55 \text{ g/cm}^3$ :

$$w_{TS} = \frac{w_{TDR} - 1,6074}{0,5017} \quad (22)$$

$w_{TS}$ [%]	tatsächlicher gravimetrischer Wassergehalt
$w_{TDR}$ [%]	gravimetrischer Wassergehalt aus der TDR-Messung

## 4 Aufbau des Modellversuchs

### 4.1 Allgemeines

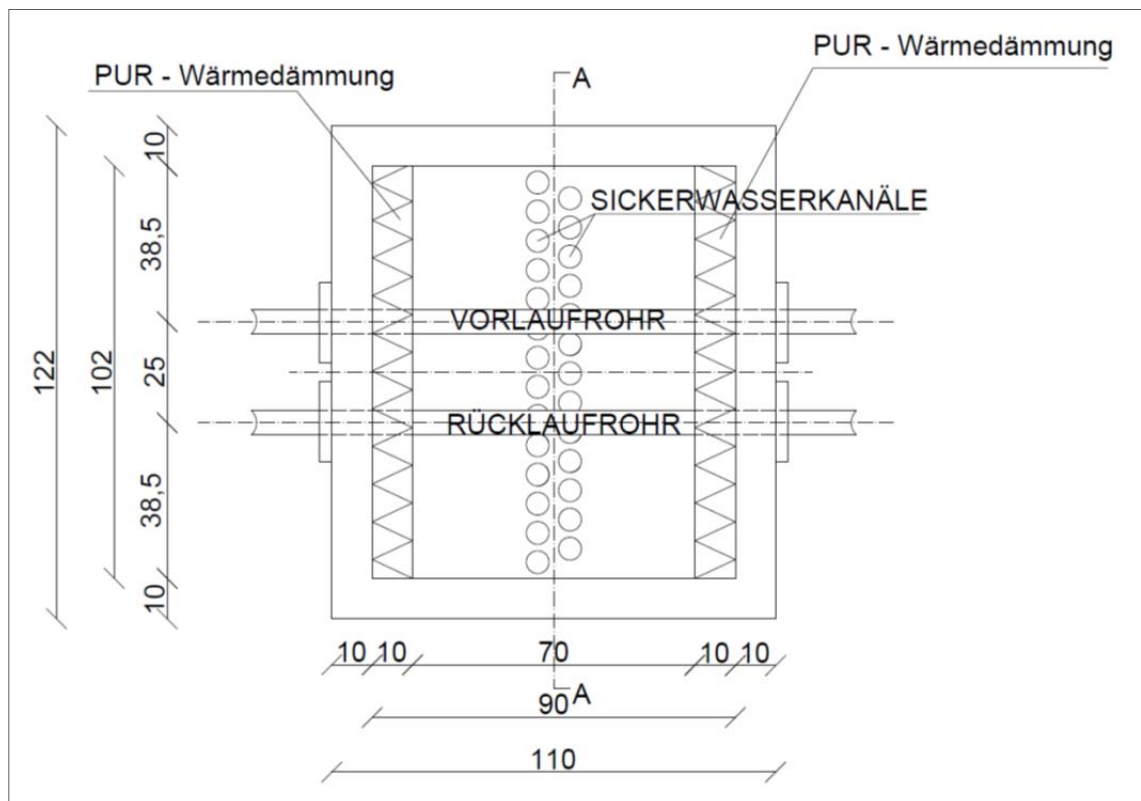


**Abb. 27:** Modellversuch (16.07.2014)

Für den Modellversuch bzw. Laborgroßversuch wurde ein Stahlbehälter verwendet, der in der Abb. 27 dargestellt ist. Dieser Stahlbehälter wurde im Jahr 2000 für die Untersuchung von Strömungsvorgängen von Druckluft in teilgesättigten Böden und im Tunnelbau verwendet (Kammerer, 2000).

Dieser Stahlbehälter wurde danach umgebaut und für die Durchführung von Versuchen im Technikumsmaßstab zur Untersuchung der Austrocknungsvorgänge in Bettungsmaterialien rund um Fernwärmeleitungen verwendet (Wenigmann, 2011). Dieser Versuch wurde im Jahr 2011 bereits von Rainer Wenigmann durchgeführt. Nach der Auswertung des Versuchs musste allerdings festgestellt werden, dass die Messergebnisse falsch waren. Aus diesem Grund hätte der Ver-

such wiederholt werden müssen. Die Wiederholung und Auswertung dieses Versuchs ist daher Gegenstand der vorliegenden Masterarbeit.



**Abb. 28:** Grundriss des Stahlbehälters für den Modellversuch

In Abb. 28 ist der Grundriss des Stahlbehälters, der für den Modellversuch verwendet wurde, dargestellt.

Der Behälter hat im Grundriss innere Abmessungen von 90 cm x 102 cm und eine Höhe von 120 cm.

In der Mitte des Behälters wurden zwei Fernwärmerohre (ein Vorlaufrohr und ein Rücklaufrohr) mit einem Durchmesser von 7 cm eingebaut (siehe Abb. 29). Um die Wärmeverluste zu minimieren, wurden auf den Längsseiten des Behälters je 10 cm dicke Wärmedämmplatten eingebaut.



**Abb. 29:** Vorlauf und Rücklaufrohr des Modellversuchs (28.08.2014)

Die Bohrungen, die sich auf der Sohle des Behälters befinden, wurden als Sickerwasserkanäle verwendet. Diese Kanäle haben die Aufgabe, vorhandenes Sickerwasser abzuleiten (siehe Abb. 30). Diese Entwässerungsbohrungen wurden bei den Versuchen von Kammerer für das Einströmen der Druckluft verwendet (Wenigmann, 2011). Um den Bodentransport abzuhalten, wurde die Sohle mit Vlies abgedeckt.



**Abb. 30:** Sickerwasserkanäle im Stahlbehälter

Der Thermosand wurde zunächst eingeschlämmt und in mehreren Lagen eingebaut. Durch das Einschlämmen des Thermosands wurde er in dichtester Lagerung eingebaut. Nachdem der Thermosand eingebaut wurde, wurde seine Trockendichte durch die Aufnahme der Probe mittels eines Steckzylinders bestimmt. Nach der Austrocknung und Wiegung des Materials betrug die Trockendichte  $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$ . Der anfängliche Wassergehalt betrug  $w = 31,7 \%$ . Die Trockendichte wurde anschließend für die Umrechnung des volumetrischen in den gravimetrischen Wassergehalt verwendet.

## 4.2 Einbau der Messfühler

In dem Schnitt A-A (siehe Abb. 33) ist die genaue Lage der Messfühler eindeutig dargestellt. Jeder Messfühler besteht aus einer TDR-Sonde zur Wassergehaltsmessung und einem Thermoelement des Typs K zur Temperaturmessung, die gleichzeitig eingebaut wurden.

Zuerst wurde der Thermosand genau bis auf die halbe Höhe des Behälters ( $H = 60,6 \text{ cm}$ ) bzw. bis zu den Rohrachsen eingebaut. Danach wurden die Fühler mit den Nummern 0 bis 6 eingebaut (siehe Abb. 31).





**Abb. 31:** Die Fühler 00 bis 06 (13.08.2014)

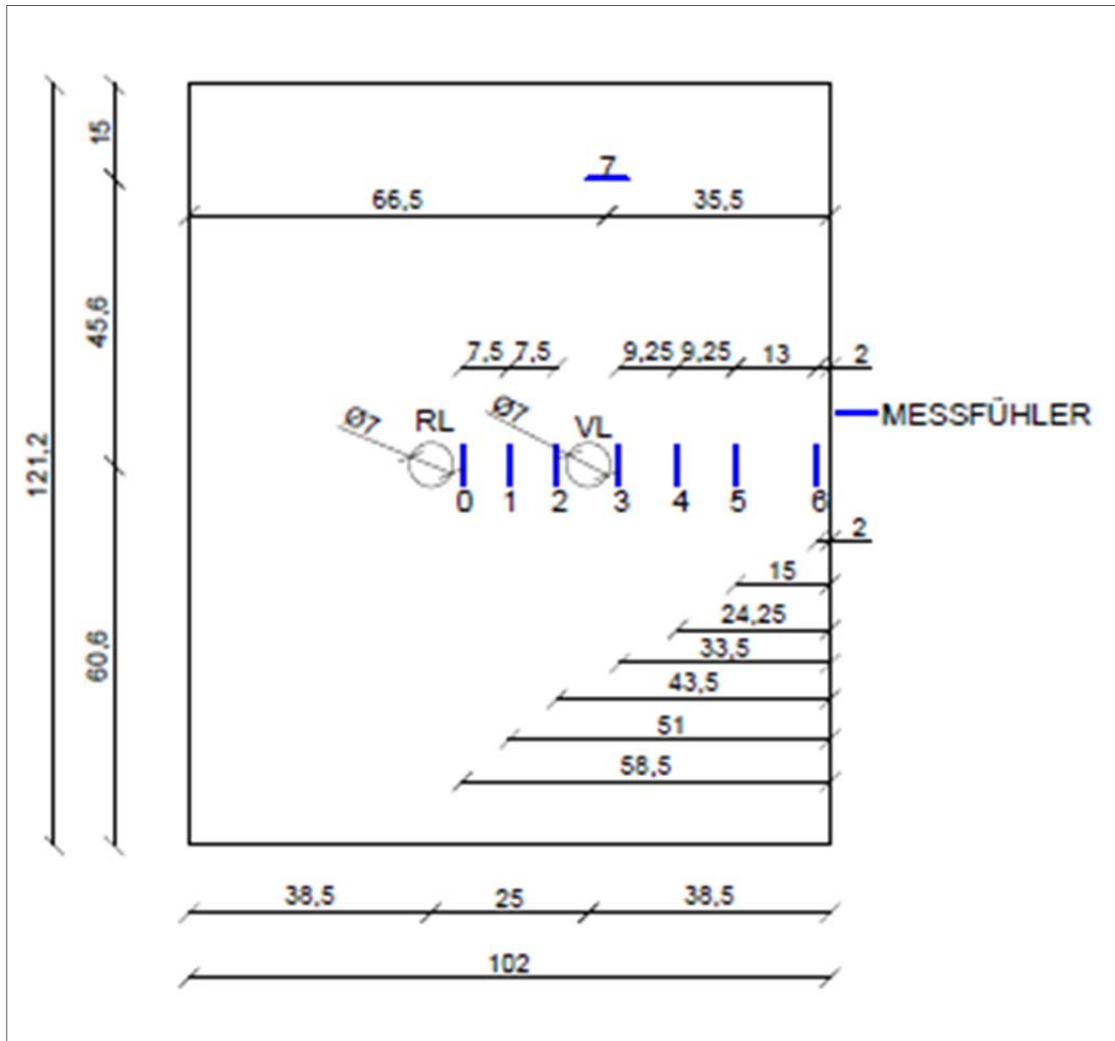
Die Fühler mit den Nummern 0 bis 2 wurden zwischen dem Rücklauf- und dem Vorlaufrohr eingebaut. Die Fühler mit den Nummern 3 bis 6 wurden zwischen dem Vorlaufrohr und der Außenwand des Behälters eingebaut (siehe Abb. 33). Nach dem Einbau dieser sieben Fühler wurde der Behälter bis 15 cm unter die Oberkante weiter mit Thermosand gefüllt. Dann wurde der letzte Fühler mit der Nummer 7 eingebaut (siehe Abb. 32 und Abb. 33).



**Abb. 32:** Der Fühler 07 (15.08.2014)

Abschließend wurde der Behälter bis zur Oberkante mit Thermosand gefüllt.

Noch während der Versuchsdurchführung wurde die Raumtemperatur gemessen und aufgezeichnet.



**Abb. 33:** Schnitt A-A des Stahlbehälters des Modellversuchs mit den Messfühlern

### 4.3 Versuchsablauf

Nachdem die Fühler und der Thermosand wie vorgesehen im Behälter waren, musste für die gewünschte Temperatur in den Rohren gesorgt werden. Zu diesem Zweck musste ein Heizgerät an das jeweilige Rohr angeschlossen werden (siehe Abb. 34).

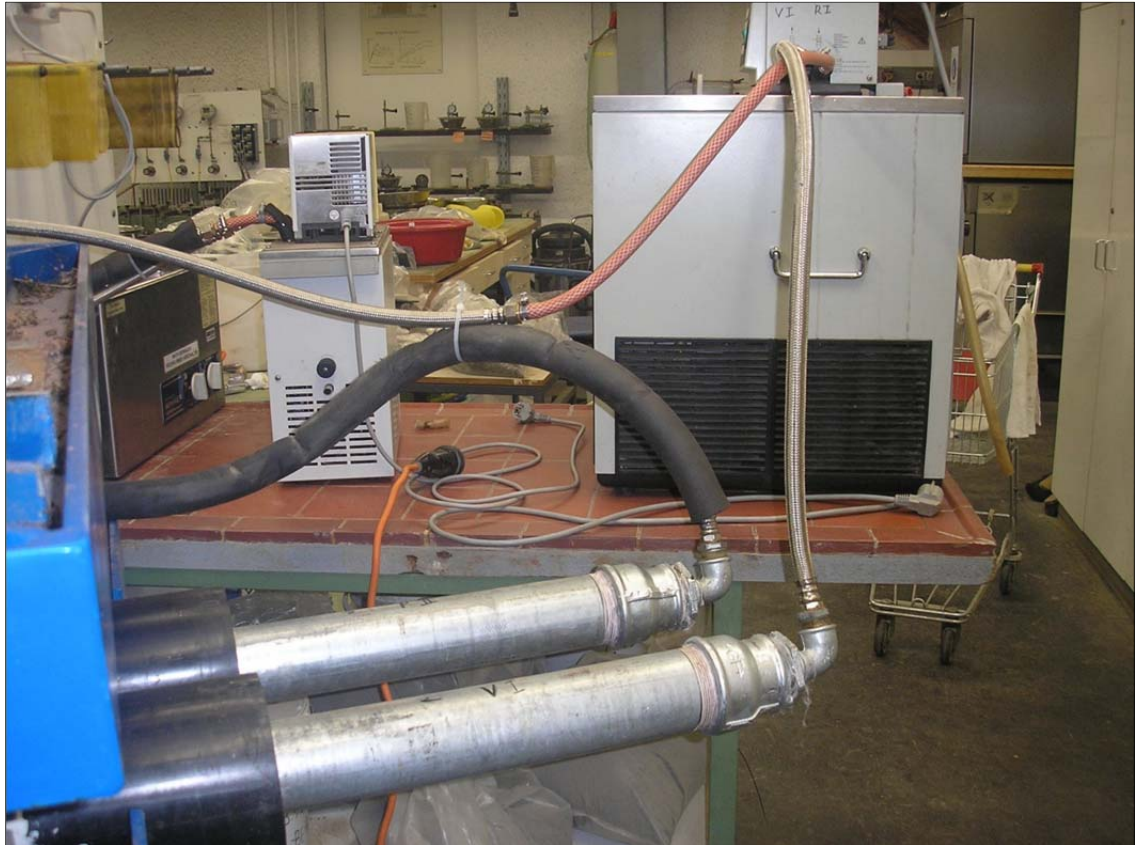


**Abb. 34:** Die Heizgeräte LAUDA (28.08.2014)

Wie Abb. 34 zeigt, wurden diese Heizgeräte an die beiden Seiten der Rohre angeschlossen. Die verwendeten Heizgeräte haben eigene Flüssigkeitstanks, in denen sich destilliertes Wasser befindet, das auf die gewünschte Temperatur erhitzt wird. Das heiße Wasser fließt aus dem Tank durch einen Schlauch in das Rohr und das abgekühlte Wasser fließt aus dem Rohr durch einen anderen Schlauch wieder in den Tank zurück, wo das Wasser wieder erhitzt wird. Somit befindet sich das Wasser immer in einem Kreislauf und hat immer die eingestellte Temperatur (siehe Abb. 35).

Da im Behälter zwei Rohre (Vorlauf- und Rücklaufrohr) vorhanden sind, bei denen eine unterschiedliche Temperatur erreicht werden muss, wird für jedes Rohr ein Heizgerät benötigt.

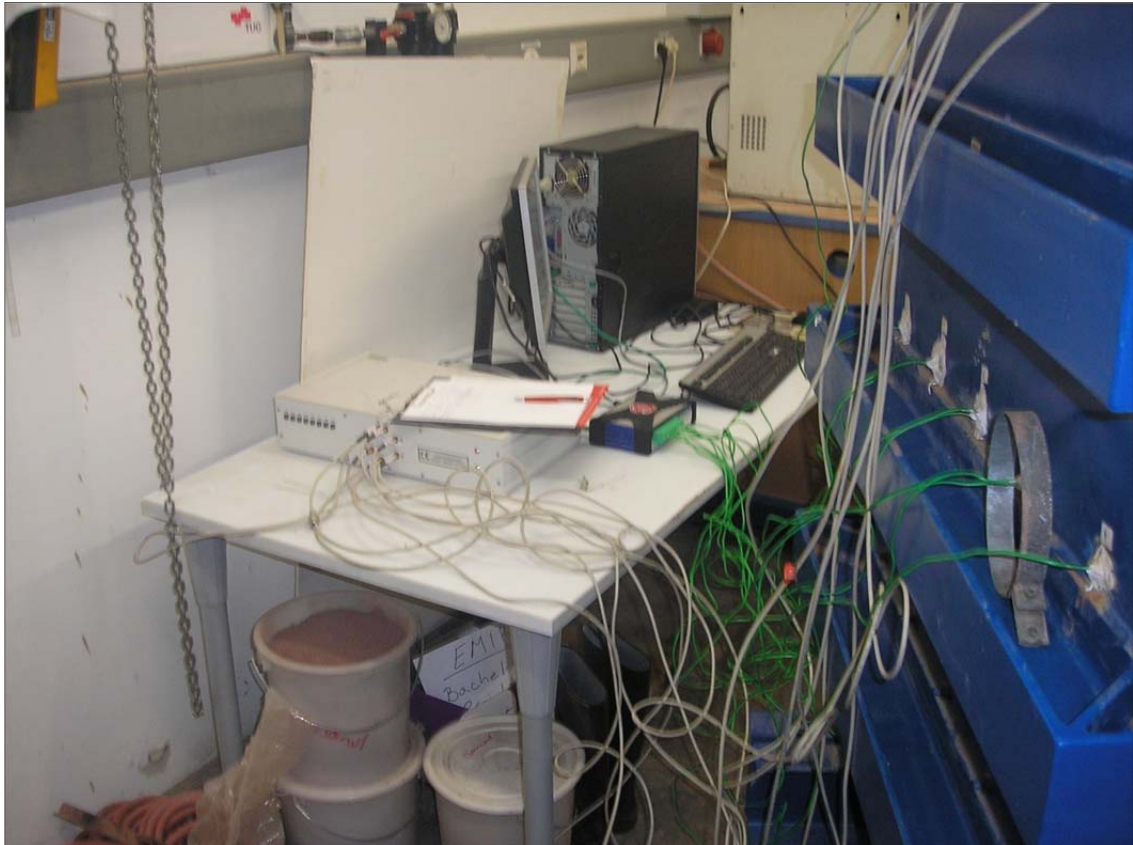
Diese Geräte haben einen Temperaturbereich zwischen  $-30\text{ °C}$  und  $120\text{ °C}$  und können auch als Kühlgeräte für den Frostversuch verwendet werden.



**Abb. 35:** Anschluss der Heizgeräte an die Rohre (28.08.2014)

Nachdem die Heizgeräte an die Rohre angeschlossen und die gewünschte Temperatur eingestellt wurde, fängt die Messung an.

Die Temperatur wurde mit Hilfe der Thermoelemente des Typs K und der Wassergehalt mit Hilfe der TDR-Sonden gemessen. Die fertig eingebaute Messeinrichtung ist in Abb. 36 zu sehen.



**Abb. 36:** Fertig eingebaute Messeinrichtung (28.08.2014)

Die gesamte Messung wurde mit einem Computer gesteuert, wodurch es gleichzeitig möglich war, die jeweiligen Daten mit Hilfe einer Software aufzuzeichnen.

Die Temperaturmessung wurde mit Hilfe der Software „CATMAN“ von der Firma HBM gesteuert (siehe Abb. 37).

Die Raumtemperatur wurde ebenfalls von der Software „CATMAN“ gesteuert und gespeichert.

Die Software „ET“ der Fa. Easy Test aus Berlin wurde hingegen für die Wassergehaltsmessung verwendet. (siehe Abb. 38).

Alle gemessenen Daten wurden gespeichert und mittels MS Excel weiter verarbeitet und ausgewertet (siehe Kapitel 5).

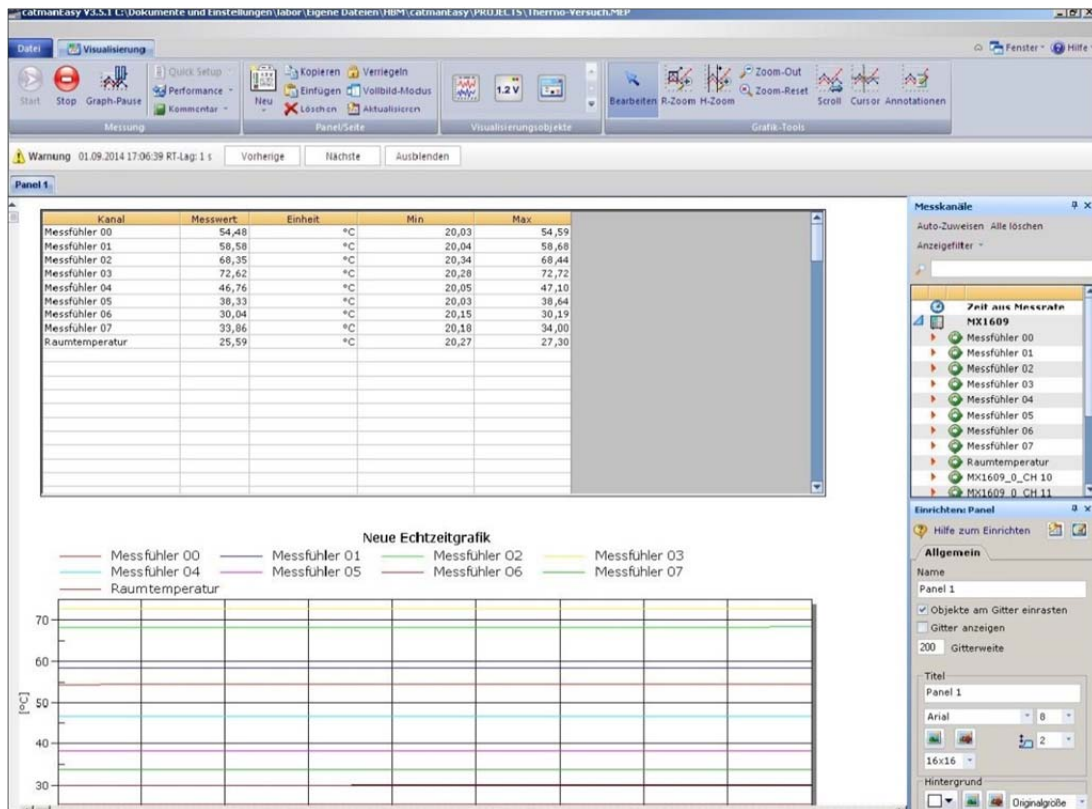


Abb. 37: Software „CATMAN“ von der Firma HBM für die Temperaturmessung (01.09.2014)

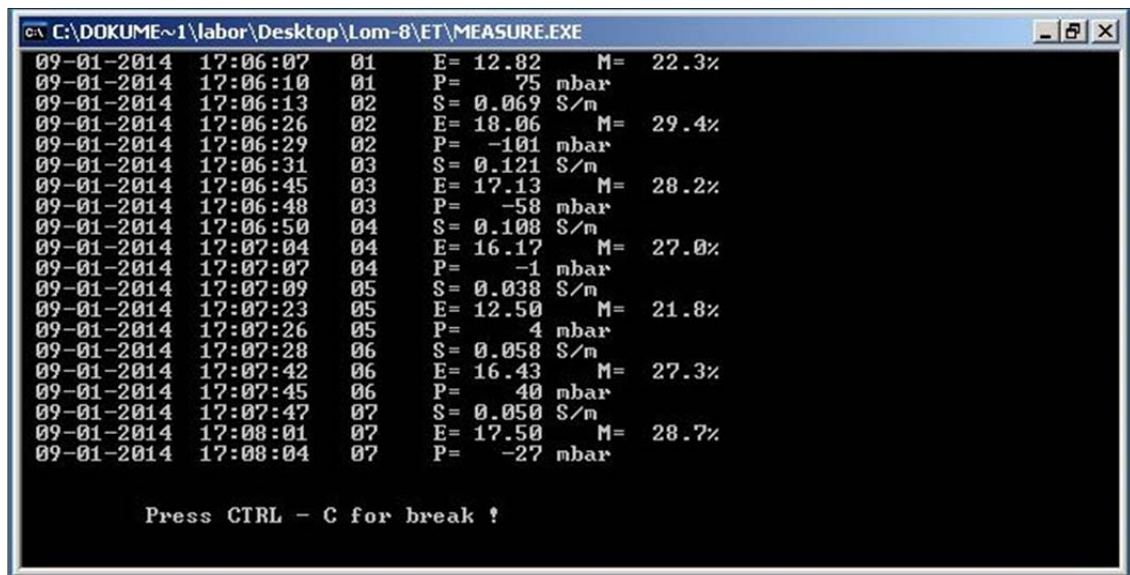
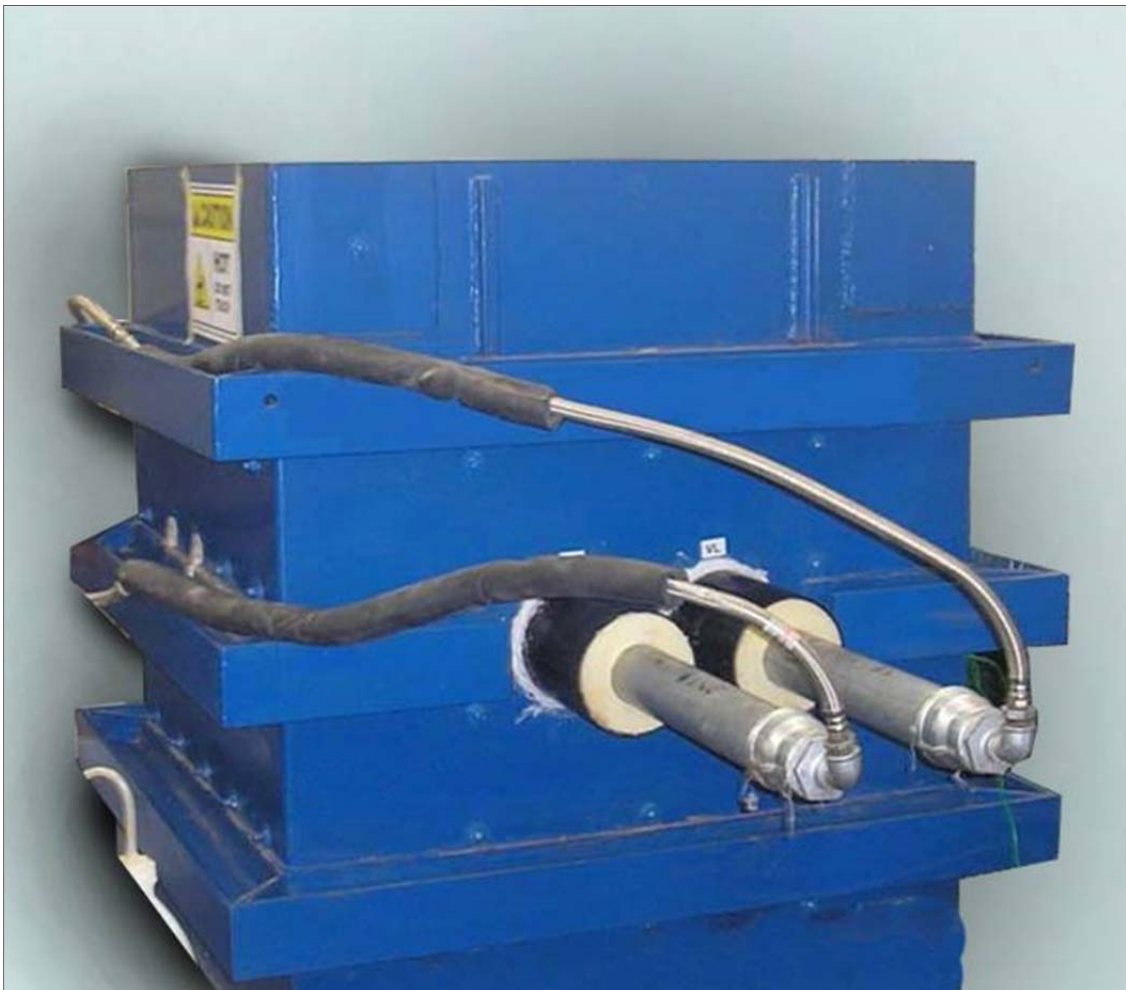


Abb. 38: Software „ET“ von der Firma EASY TEST, Berlin, für die Wassergehaltsmessung (01.09.2014)

Die fertig eingebaute Vorrichtung mit allen Messeinrichtungen sowie den angeschlossenen Geräten für den Laborgroßversuch ist der Abb. 39 zu entnehmen.



**Abb. 39:** Fertig eingebauter Laborgroßversuch (28.08.2014)

### 4.3.1 Zeitlicher Ablauf des Versuchs

Nachdem die Vorrichtung für die Durchführung des Laborversuchs fertiggestellt wurde, wurde zuerst die Nullmessung (Messung ohne Erhitzung in den Rohren) vorgenommen. Diese Nullmessung nahm ungefähr zwei Tage in Anspruch.

Danach wurde das Wasser in den Rohren erhitzt. Das Wasser im Vorlaufrohr sollte eine Temperatur von 70 °C und jenes im Rücklaufrohr 50 °C erreichen. Da die Rohre an ihren Enden nicht isoliert sind, wurde diese Temperatur um 5 °C erhöht, um die Temperaturverluste zu berücksichtigen (siehe Abb. 39). Somit wurde die Temperatur bei den Heizgeräten für das Vorlaufrohr auf 75 °C und bei jenen für das Rücklaufrohr auf 55 °C eingestellt. Diese Temperatur entspricht ungefähr der gewünschten Temperatur von 70 °C im Vorlaufrohr bzw. jener von 50 °C im Rücklaufrohr.



Ein übersichtlicher zeitlicher Ablauf des Versuchs ist in der folgenden Tabelle ersichtlich:

**Tab. 4:** Zeitlicher Ablauf des Versuchs

<b>Datum</b>	<b>Tag</b>	<b>Zeit</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>26.08.2014</b>	Dienstag	14:25	Beginn der Nullmessung
<b>27.08.2014</b>	Mittwoch	08:45	Das destillierte Wasser wurde in die Rohre eingepumpt (ohne Erhitzung)
<b>28.08.2014</b>	Donnerstag	15:00	Temperatur des Wassers wurde im VL auf 75 °C und im RL auf 55 °C eingestellt, was ungefähr einer realen Temperatur (ohne Verluste) von 70 °C im VL bzw. 50 °C im RL entspricht.
<b>29.08.2014</b>	Freitag	17:00	Ein kurzer Ausfall des VL-Heizgerätes
<b>08.09.2014</b>	Montag	16:40	Anfang der Bewässerung 10 l/Tag
<b>15.09.2014</b>	Montag	17:00	Ende der Bewässerung 10 l/Tag. Temperatur im VL-Rohr bleibt 75 °C und im RL 55 °C.
<b>24.09.2014</b>	Mittwoch	17:00	Ende des Versuchs

# 5 Auswertung und Interpretation der Daten

## 5.1 Allgemeines

Die Auswertung des Versuchs setzt sich aus der Datenaufbereitung bzw. aus der Sortierung der erhobenen und aufgezeichneten Daten und deren grafischer Aufbereitung zusammen. Sämtliche erhobenen Daten wurden zunächst in MS Excel importiert. Dort konnten sie leicht wunschgemäß sortiert und grafisch dargestellt werden.

Um die einzelnen Schritte der Auswertung nachvollziehbar und verständlich zu machen, sollen diese in der Folge eingehend beschrieben werden.

- **Schritt 1: Zwischenspeicherung der Daten**

Da im Lauf eines derartigen Laborgroßversuchs eine große Datenmenge entsteht, ist es sinnvoll alle zwei bis drei Tage eine Zwischenspeicherung der gesammelten Daten durchzuführen. Dies vereinfacht die anschließende Aufbereitung wesentlich.

- **Schritt 2: Importieren der Rohmessdaten in MS Excel**

Beim Speichern der Temperatur- bzw. Wassergehaltswerte werden diese zunächst als Text-Dateien erfasst. Anschließend sollten sie, aufgrund der leichteren Handhabung, in MS Excel importiert werden, um dort weiter verarbeitet werden zu können. Die entsprechenden Auszüge der Temperatur- und Wassergehaltsrohdaten sind im Anhang 7.1 und 7.2 dieser Arbeit beigefügt.

- **Schritt 3: Aufbereitung der Messdaten in MS Excel**

Nachdem die Messdaten in MS Excel importiert wurden, müssen sie sortiert werden.

Die Messwerte der jeweiligen Fühler werden in separate Spalten verteilt. Der Zeitpunkt der jeweiligen Messung wird auch in einer separaten Spalte dargestellt. Dieser Art der Datensortierung ermöglicht später eine einfachere grafische Darstellung der Daten (siehe Abb. 40 und Abb. 41).

Die Messung der Temperatur erfolgt auf einer Frequenz von 1 Hz. Das bedeutet, dass jede Sekunde ein Messwert gespeichert wird. An drei Messtagen beispielsweise entstehen demnach knapp 260 000 Messdaten. Da diese Datenmenge zu

umfangreich ist, ist es sinnvoll, sie zu reduzieren: Dafür sollte das Aufzeichnungsintervall vergrößert werden. Im vorliegenden Laborgroßversuch wurden die Daten daher in einem Zeitintervall von 5 Minuten filtrierte und nur diese Daten im Rahmen der Auswertung berücksichtigt.

Die Wassergehaltsmesswerte wurden alle 10 Minuten gespeichert.

Um eine übersichtliche grafische Darstellung der Daten in MS Excel zu ermöglichen, müssen Datum und Uhrzeit dieser Daten als Dezimalzahlen formatiert werden. Mit der Messung der Temperatur wurde beispielsweise am 26.08.2014 um 14:24:00 begonnen. In MS Excel wird diese Formatierung als „Datum“ bzw. „Uhrzeit“ bezeichnet. Wird nun eine solche Formatierung als Standard übernommen, werden das oben genannte Datum und die Uhrzeit als Dezimalzahl angezeigt. Für das oben genannte Datum und die angegebene Uhrzeit ergibt sich in MS Excel 41877,60. Diese Zahl wird als „Tag 0“ bzw. „Stunde 0“ bezeichnet. In Abhängigkeit von dieser Zahl werden die weiteren Zeitpunkte der Messung bestimmt. Fand eine Messung beispielsweise am 27.08.2014 um 14:24:00 statt, entspricht dies in MS Excel der Zahl 41878,60 (wenn die Formatvorlage „Standard“ verwendet wird). Diese Zahl wird als „Tag 1“ bzw. „Stunde 24“ der Messung bezeichnet ( $41878,60 - 41877,60 = 1$ ).

Die Wassergehaltsmesswerte müssen zusätzlich in den gravimetrischen Wassergehalt umgerechnet (siehe Unterkapitel 2.1.1.1) und mit dem Korrekturfaktor für die Trockendichte,  $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$ , korrigiert werden (siehe Unterkapitel 3.3.2.1). Jeder Fühler wurde ebenfalls mit einem Faktor multipliziert, so dass zu Beginn der Messung ein anfänglicher Wassergehalt von  $w = 31,7 \%$  stand.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Fühler 0	Fühler 1	Fühler 2	Fühler 3	Fühler 4	Fühler 5	Fühler 6	Fühler 7	Raumtemperatur	ZEIT
2	20.750	20.680	20.960	20.940	20.770	21.000	21.830	20.570	24.050	0.00000
3	20.730	20.650	20.980	20.950	20.690	20.930	21.780	20.500	24.180	0.08333
4	20.750	20.660	20.970	20.950	20.700	20.930	21.780	20.480	24.090	0.16667
5	20.750	20.670	21.040	21.000	20.730	20.960	21.900	20.600	24.210	0.25000
6	20.710	20.630	21.010	20.970	20.680	20.910	21.840	20.530	24.200	0.33333
7	20.700	20.600	21.030	21.000	20.660	20.900	21.860	20.550	24.160	0.41667
8	20.780	20.690	21.040	21.010	20.740	20.970	21.860	20.550	24.270	0.50000
9	20.790	20.690	21.020	20.990	20.750	20.990	21.890	20.580	24.480	0.58333
10	20.750	20.650	20.960	20.920	20.770	21.010	21.850	20.520	24.370	0.66667
11	20.760	20.650	20.930	20.890	20.770	21.000	21.860	20.530	24.080	0.75000
12	20.740	20.640	20.870	20.830	20.910	21.150	21.900	20.570	24.100	0.83333
13	20.760	20.660	20.840	20.800	20.860	21.100	21.870	20.550	23.870	0.91667
14	20.770	20.660	20.880	20.840	20.880	21.120	21.900	20.590	23.910	1.00000
15	20.800	20.690	20.920	20.880	20.880	21.110	21.870	20.560	23.870	1.08333
16	20.780	20.670	20.980	20.950	20.830	21.080	21.830	20.520	23.800	1.16667
17	20.770	20.660	21.000	20.960	20.810	21.060	21.820	20.510	23.960	1.25000
18	20.750	20.650	21.060	21.030	20.780	21.030	21.860	20.540	23.890	1.33333
19	20.750	20.640	21.070	21.040	20.740	21.000	21.840	20.520	23.810	1.41667
20	20.770	20.660	21.060	21.030	20.750	21.010	21.860	20.530	23.860	1.50000
21	20.790	20.680	20.960	20.920	20.890	21.150	21.880	20.550	23.770	1.58333
22	20.790	20.680	20.860	20.830	20.840	21.100	21.910	20.580	23.880	1.66667
23	20.770	20.670	20.960	20.920	20.770	21.030	21.860	20.530	23.730	1.75000
24	20.750	20.640	21.030	20.990	20.750	21.020	21.850	20.520	23.990	1.83333
25	20.740	20.630	21.050	21.030	20.750	21.020	21.950	20.620	23.770	1.91667

Abb. 40: Sortierte und aufbereitete Temperaturmessdaten – Auszug

	A	B	C	D	E	F	G	H
2	FÜHLER 0				FÜHLER 1			
3	$\theta$ - Fühler 0	w - Fühler 0	Kor. Faktor	Tag	$\theta$ - Fühler 1	w - Fühler 1	Kor. Faktor	Tag
4	25.90	18.50	31.70	0.50	23.80	17.00	31.70	0.50
5	25.60	18.29	31.26	0.67	23.50	16.79	31.18	0.67
6	26.00	18.57	31.84	0.83	23.60	16.86	31.35	0.84
7	25.80	18.43	31.55	1.00	23.80	17.00	31.70	1.00
8	25.10	17.93	30.54	1.17	23.40	16.71	31.00	1.17
9	25.10	17.93	30.54	1.33	23.30	16.64	30.83	1.34
10	25.10	17.93	30.54	1.50	23.30	16.64	30.83	1.50
11	25.10	17.93	30.54	1.67	23.30	16.64	30.83	1.67
12	25.10	17.93	30.54	1.83	23.40	16.71	31.00	1.84
13	25.10	17.93	30.54	2.00	23.40	16.71	31.00	2.00
14	25.10	17.93	30.54	2.17	23.40	16.71	31.00	2.17
15	25.00	17.86	30.39	2.33	23.40	16.71	31.00	2.34
16	25.10	17.93	30.54	2.50	23.40	16.71	31.00	2.50
17	25.10	17.93	30.54	2.67	23.40	16.71	31.00	2.67
18	25.10	17.93	30.54	2.83	23.40	16.71	31.00	2.84
19	25.00	17.86	30.39	3.00	23.40	16.71	31.00	3.00

Abb. 41: Sortierte und aufbereitete Wassergehaltsmessdaten für die Fühler 0 und 1 – Auszug

#### • **Schritt 4: Grafische Darstellung der Daten**

Nach der Aufbereitung der Daten wurden sie mit Hilfe von X-Y-Diagrammen in MS Excel in Grafiken umgewandelt.

Es wurden folgende Diagramme erstellt:

- Ganglinie der Temperatur in Abhängigkeit der Zeit
- Ganglinie des Wassergehalts in Abhängigkeit der Zeit
- Temperaturprofile für bestimmte Zeitpunkte in Abhängigkeit des Fühlerabstandes
- Wassergehaltsprofile für bestimmte Zeitpunkte in Abhängigkeit des Fühlerabstandes

Die Ganglinien bilden die Temperatur  $\vartheta$  [°C] bzw. den Wassergehalt  $w$  [%] (auf der Y-Achse) in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [h] (auf der X-Achse) ab.

Die Diagramme der Temperatur- bzw. Wassergehaltsprofile zeigen die Temperatur  $\vartheta$  [°C] bzw. den Wassergehalt  $w$  [%] für einen bestimmten Zeitpunkt (auf der Y-Achse) in Abhängigkeit von dem Fühlerabstand  $d$  [cm] (auf der X-Achse).

## **5.2 Ganglinien der Temperatur und des Wassergehalts**

In Abb. 42 und Abb. 43 sind die Ganglinien der Temperatur bzw. des Wassergehalts dargestellt. Die Messdaten, die diese Grafik ergeben haben, wurden innerhalb eines Monats in den vier folgenden Phasen aufgezeichnet:

#### • **Phase 1: Nullmessung**

Diese Phase stellt den Anfang der Messung dar. Zu diesem Zeitpunkt waren die Heizgeräte noch nicht eingeschaltet. Diese Nullmessung ist demnach eine Messung ohne Temperatur bzw. eine Messung auf Raumtemperatur. Diese erste Phase nahm ungefähr zwei Tage in Anspruch.

In der Phase 1 ist die Temperatur mehr oder weniger konstant und entspricht ungefähr der Raumtemperatur. Die Temperatur in dieser Phase liegt zwischen 21 und 23 °C.

Der Wassergehalt nimmt in dieser Phase langsam ab und zwar von 31,5 % auf 30,5 %. Dies liegt daran, dass zu Beginn der Messung noch Wasser im Behälter vorhanden ist, das anschließend ausrinnt.

- **Phase 2: Vorlauftemperatur 75 °C, Rücklauftemperatur 55 °C**

Nachdem die Heizgeräte eingeschaltet wurden, beginnt die zweite Messphase. Diese Phase dauerte ungefähr 11 Tage. Die Temperatur wurde im Vorlaufrohr auf 75 °C und im Rücklaufrohr auf 55 °C eingestellt.

Zu Beginn dieser Phase gibt es natürlich einen Temperaturanstieg bei jedem Temperaturfühler. Nach ungefähr drei Tagen wurde die Temperatur jedoch konstant. Jene Fühler, die sich in der Nähe der Rohre befanden, haben die erforderliche Temperatur schneller erreicht. Fühler 3 beispielsweise benötigte ungefähr einen Tag, um die erforderliche Temperatur zu erreichen, während Fühler 6 ungefähr drei Tage dafür brauchte. Nachdem alle Fühler die erforderliche Temperatur erreicht haben, bleibt diese während der gesamten Phase konstant. Der genaue Wert der erreichten Temperatur in dieser Phase ist als Temperaturprofil in Unterkapitel 5.4 dargestellt (siehe Abb. 45).

Zu Beginn der Phase 2 kam es auch zu einem einstündigen Ausfall des Vorlaufheizgeräts.

Der Thermosand zeigte auch während dieser Phase langsame und lineare Austrocknungseigenschaften. In 11 Tagen hat der Wassergehalt nur zirka 2 % abgenommen (von 30,5 % auf 28,5 %).

- **Phase 3: Vorlauftemperatur 75 °C, Rücklauftemperatur 55 °C mit Bewässerung 10 l/Tag**

In der Phase 3 wurde die Temperatur konstant gehalten und blieb gleich wie in den vorigen Phasen. Diese Phase hat 8 Tage gedauert. Es konnte auch gezeigt werden, dass eine Bewässerung bzw. Wasser keinen Einfluss auf die Temperatur hat. D.h., die Temperatur blieb sowohl während dieser Phase als auch während des gesamten Versuchs konstant.

In dieser Phase kam es natürlich zu einem Wassergehaltsanstieg, da der Thermosand täglich bewässert wurde. Aus Abb. 43 geht deutlich hervor, dass der Wassergehalt immer periodisch zu- und abnahm. Dies liegt daran, dass die Bewässerung jeden Tag zur selben Zeit durchgeführt wurde (alle 24 Stunden).

- **Phase 4: Vorlauftemperatur 75 °C, Rücklauftemperatur 55 °C ohne Bewässerung**

Diese Phase ist die letzte Phase des Versuchs und sie dauerte 8 Tage. Mit dem Abschluss dieser Phase wurde auch die Messung abgeschlossen.

Die Temperatur blieb auch während dieser Phase konstant und gleich wie in den vorigen Phasen.

Der Wassergehalt nahm wieder langsam und linear ab.

Die außen liegenden Fühler 5 bis 7 wurden auch während der gesamten Messdauer von der Raumtemperatur beeinflusst. Dies belegen die periodischen Schwankungen in den Linien dieser Fühler.

Im Anhang 7.3 bzw. 7.4 sind die Ganglinien der Temperatur bzw. des Wassergehalts deutlicher in einem größeren Maßstab zu finden.

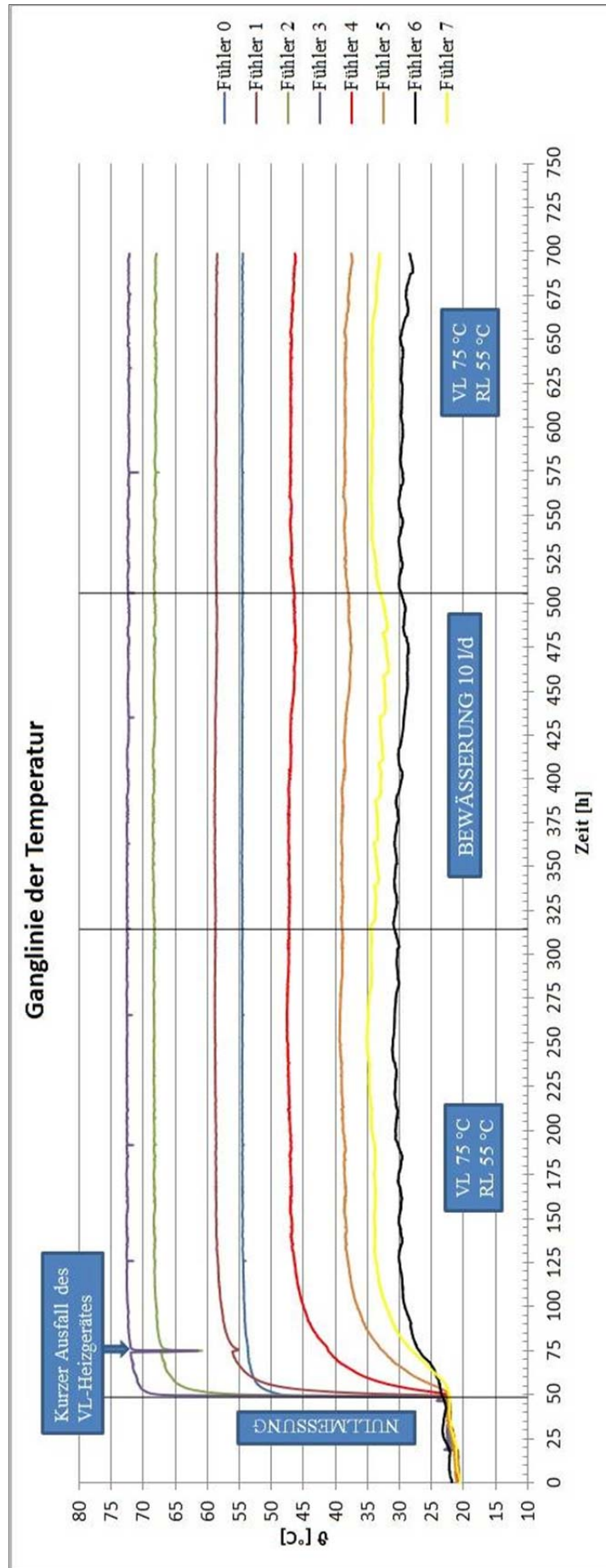


Abb. 42: Ganglinie der Temperatur



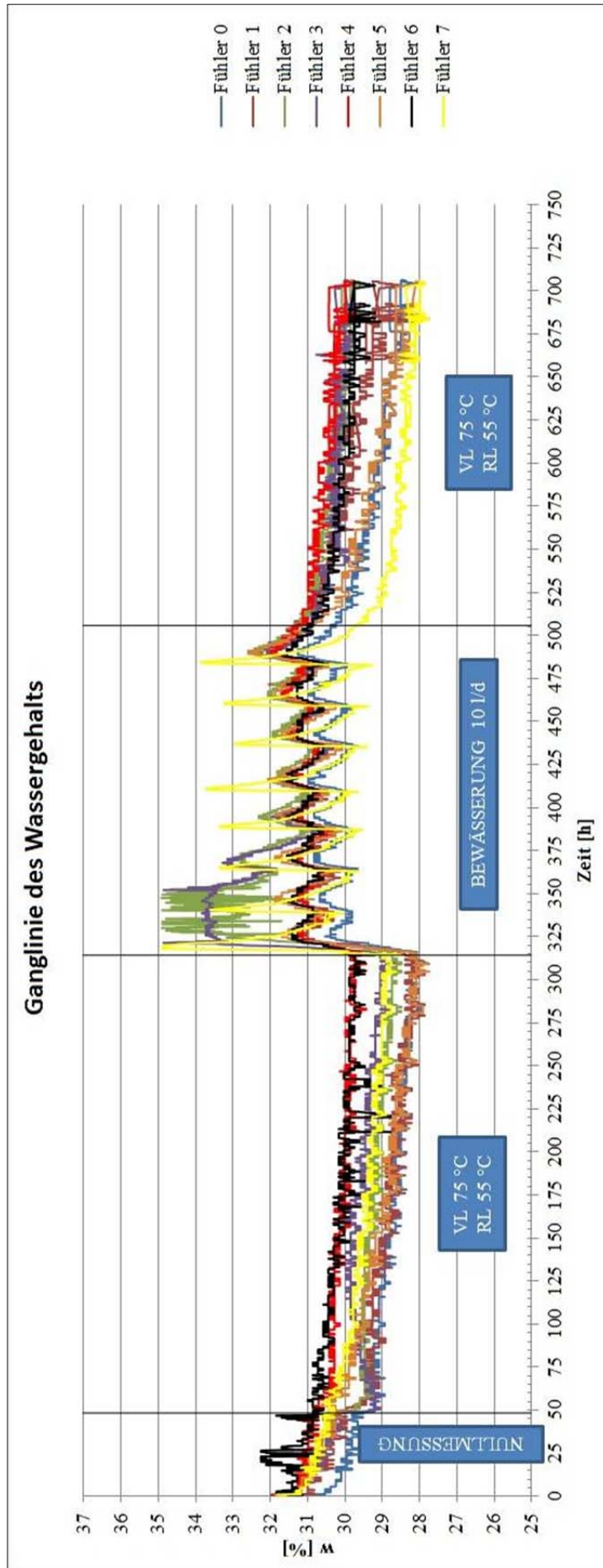
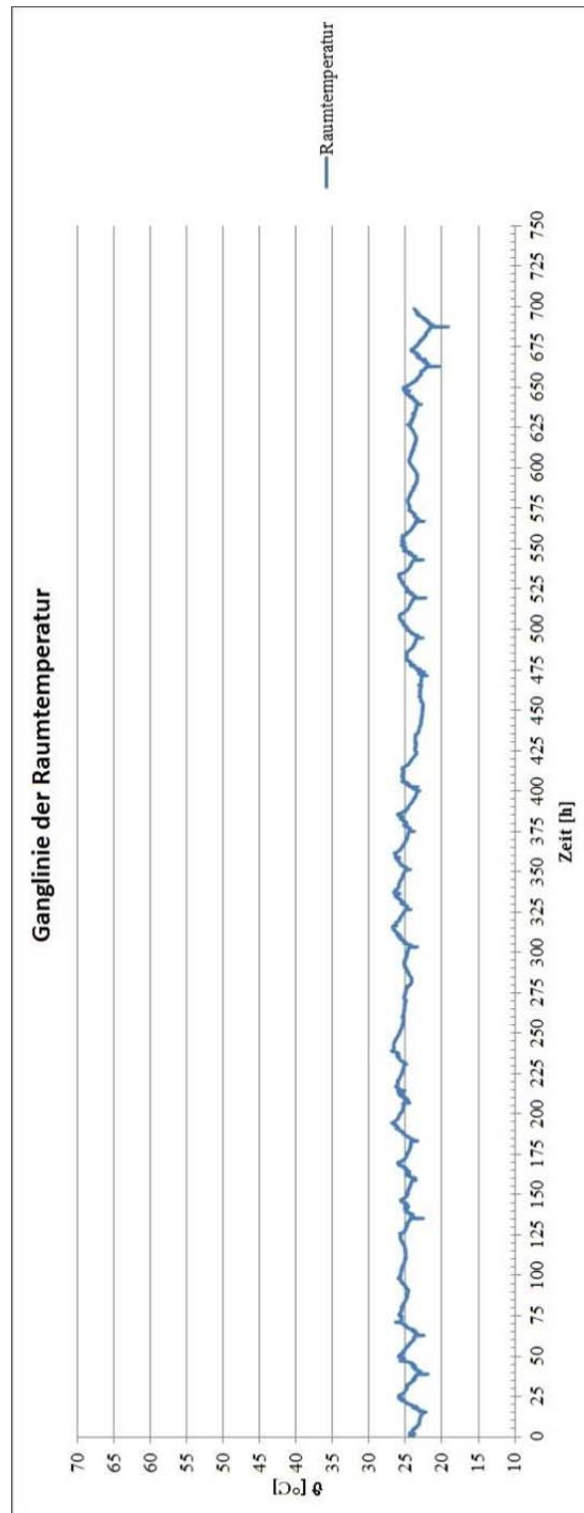


Abb. 43: Ganglinie des Wassergehalts

### 5.3 Ganglinie der Raumtemperatur

Abb. 44 zeigt die Kurve der Raumtemperatur während des Versuchs. Die Raumtemperatur lag während des gesamten Versuchs bei ungefähr 24 °C mit periodischen Schwankungen von  $\pm 2$  °C.

Die Ganglinie der Raumtemperatur ist im Anhang 7.5 übersichtlich dargestellt.



**Abb. 44:** Ganglinie der Raumtemperatur

## 5.4 Temperatur- und Wassergehaltsprofile

Abb. 45 stellt eine Temperaturmessung vom 05.09.2014 um 04:23 dar. Die X-Achse zeigt dabei den Abstand zwischen den Fühlern in cm und die Y-Achse die Temperatur in °C.

Fühler 3, der sich an der äußeren Seite des Vorlaufrohrs befand, wies die höchste Temperatur auf. Es wäre allerdings zu erwarten gewesen, dass der Fühler 2, der sich an der Innenseite des Vorlaufrohrs befand, die höchste Temperatur anzeigen würde, weil die Wärme dabei von beiden Seiten, sowohl von der Vorlaufrohrseite als auch von der Rücklaufrohrseite, kam. Der Grund dafür könnte darin liegen, dass der Fühler sich durch die Verfüllung des Thermosands verschoben hat. Es könnte auch sein, dass dieser Fühler aufgrund der starken Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt die höchste Temperatur angezeigt hat. Da die Ergebnisse der Wassergehaltmessung nur Annäherungswerte und nicht ganz genau sind, kann dieser Zusammenhang nicht erklärt werden.

Da der Temperaturverlauf während der gesamten Messung konstant geblieben ist, reicht ein Profil zur Veranschaulichung aus. Alle anderen Profile würden nämlich dem dargestellten sehr ähneln, weswegen sie nicht ausgearbeitet wurden.

Die Wassergehaltsprofile sind in Abb. 46 zu sehen. Da der Wassergehaltsverlauf nicht konstant war, ist es sinnvoll, für unterschiedliche Zeitpunkte unterschiedliche Wassergehaltsprofile darzustellen, um die Entwicklung zu veranschaulichen. Deswegen ist für Phase 2, Phase 3 und Phase 4 des Versuchs jeweils ein Profil abgebildet.

Das Profil aus Phase 2 entstammt der Messung vom 05.09.2014 um 04:23, jenes aus Phase 3 der Messung vom 13.09.2014 um 22:26 und das Profil aus Phase 4 spiegelt die Messung vom 19.09.2014 um 13:54.

Abb. 46 zeigt deutlich, dass während Phase 2 der niedrigste und während Phase 3 der höchste Wassergehalt gemessen wurde. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Material während der Phase 3 bewässert wurde.

Da die Ergebnisse der Wassergehaltmessung nur näherungsweise genau sind, können die räumliche Verteilung des Wassergehalts sowie der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Temperatur nicht erklärt werden.

Die Temperatur- und Wassergehaltsprofile sind im Anhang 7.7 bzw. 7.8 in einem großen Maßstab in übersichtlicher Form dargestellt.

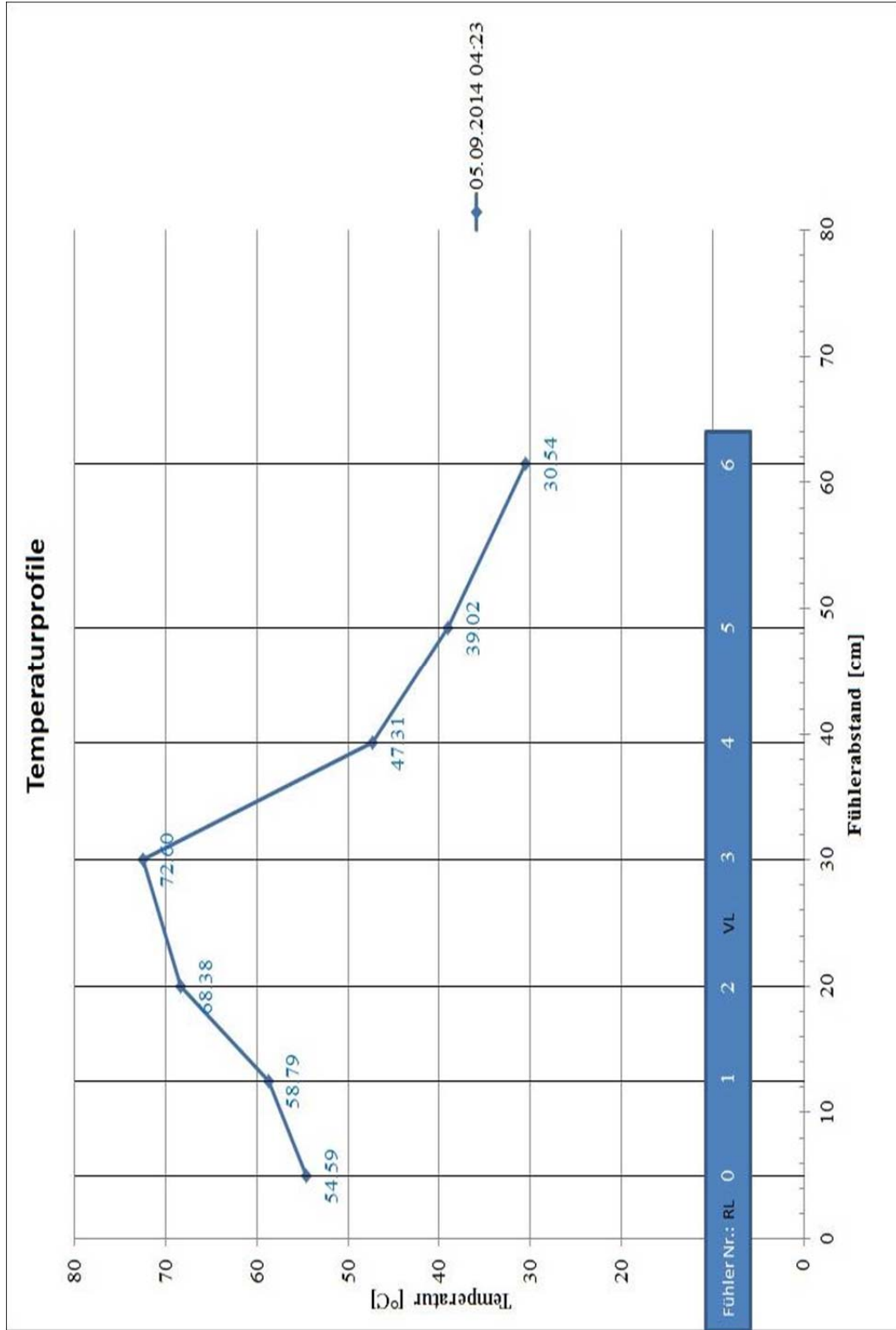
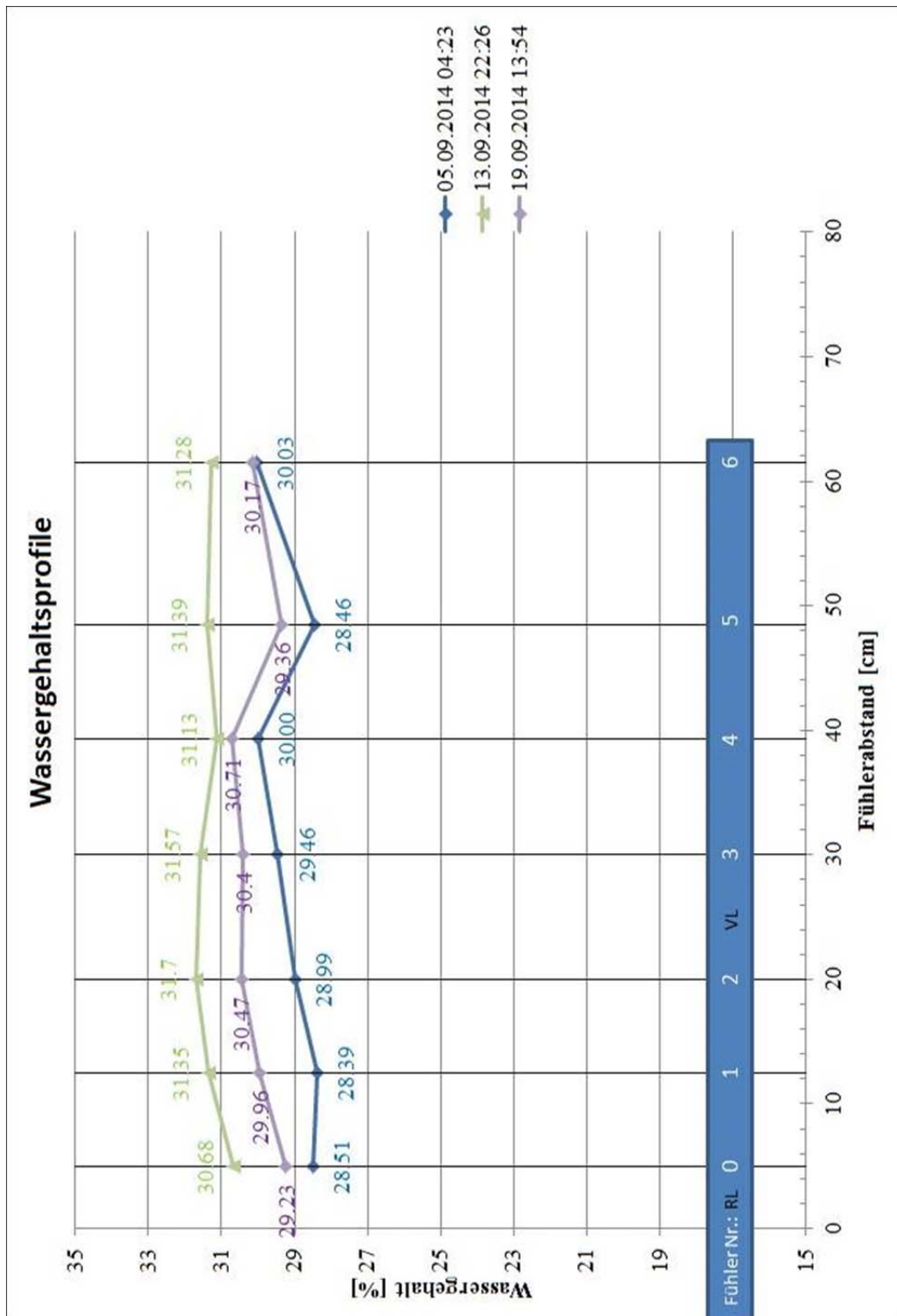


Abb. 45: Temperaturprofil für einen bestimmten Zeitpunkt



**Abb. 46:** Wassergehaltsprofile für bestimmte Zeitpunkte

## 5.5 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

### 5.5.1 Allgemeines

Zeitgleich mit dieser Masterarbeit wurde auch die Masterarbeit „Thermal Properties of Soils – Theory, Calculations, Applications and Measurement“ von Diana Rusu verfasst. Einer der Schwerpunkte dieser Masterarbeit ist die Messung und Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Thermosand. Die in dieser Arbeit gewonnenen Daten dienen als Grundlage für die Wärmeleitfähigkeitsbestimmung des Thermosands im Laborgroßversuch, der im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführt wurde.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit des Thermosands erfolgte mit denselben Bodenproben, die für die Kalibrierung der TDR-Sonden verwendet wurden (siehe Unterkapitel 3.3.2). Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  sollte nämlich mit denselben Proben ( $\rho_d = 1,25 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_d = 1,55 \text{ g/cm}^3$ ;  $w = 5 \%$ ,  $15 \%$  und  $25 \%$ ) gemessen werden. Nach der Auswertung ergibt sich eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in Abhängigkeit von der Trockendichte  $\rho_d$  und dem Wassergehalt  $w$ .

Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit Hilfe des Geräts TK04 und mit Hilfe einer Halbraum-Sonde gemessen (siehe Abb. 47).

TK04 ist ein Wärmeleitfähigkeitsmessgerät, das von der Firma TeKa aus Deutschland hergestellt wird. Es hat eine Genauigkeit von  $\pm 2 \%$  und sein Messbereich liegt zwischen  $0,1$  und  $10 \text{ W/mK}$  (Bodenprobentemperatur von  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Rusu, 2014).

Die Wärmeleitfähigkeit wird mittels der Halbraum-Sonde (HLQ) gemessen. Zu diesem Zweck wird die Sonde auf die Oberfläche der Probe gelegt, die flach und glatt sein muss. Die Wärmeleitfähigkeit wird anschließend ausgehend vom Temperaturanstieg innerhalb der Probe mit der Zeit berechnet. Die Messwerte werden mit Hilfe einer speziellen Software aufgezeichnet (Rusu, 2014). Das Messprinzip wird in der Masterarbeit „Thermal Properties of Soils – Theory, Calculations, Applications and Measurement“ von Diana Rusu im Detail beschrieben. An dieser Stelle sein nur kurz die Vorgehensweise genannt, um das Vorgehen während des Versuchs nachvollziehbar zu machen.



**Abb. 47:** Wärmeleitfähigkeitsmessgerät TK04 mit der Halbraum-Sonde HLQ (TeKa, 2014)

## 5.5.2 Ganglinie der Wärmeleitfähigkeit

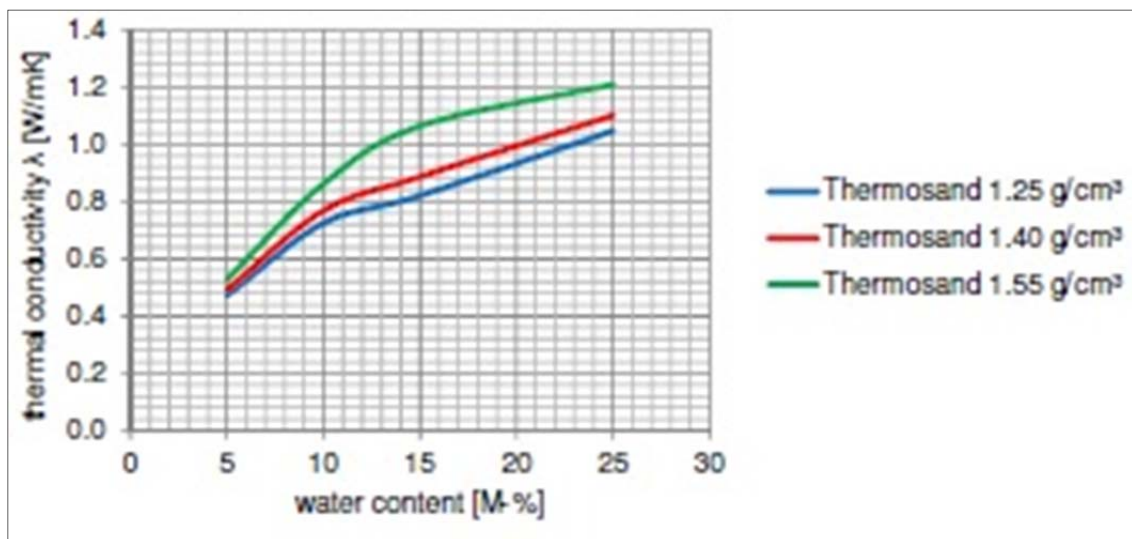
Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit dem Wärmeleitfähigkeitsmesssystem TeKa auf den zylindrischen Bodenproben des Thermosands bestimmt. Diese Proben wiesen unterschiedliche Trockendichten ( $\rho_d = 1,25 \text{ g/cm}^3$ ;  $1,40 \text{ g/cm}^3$  und  $1,55 \text{ g/cm}^3$ ) und unterschiedliche Wassergehalte ( $w = 5 \%$ ;  $15 \%$  und  $25 \%$ ) auf. Das Ergebnis der Messung für jede Trockendichte ist eine Kurve, die von dem Wassergehalt  $w$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  abhängig ist (siehe Abb. 48).

Da die Trockendichte  $\rho_d$  des eingebauten Thermosands  $1,40 \text{ g/cm}^3$  beträgt, ist für diese Masterarbeit nur die rote Kurve aus Abb. 48 relevant.

Die Gleichung der roten Kurve wurde in MS Excel ermittelt und lautet wie folgt:

$$\lambda = 0,3723 \cdot \ln(w) - 0,1101 \quad (23)$$

$\lambda$	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
$w$	[%]	gravimetrischer Wassergehalt



**Abb. 48:** Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Thermosands in Abhängigkeit von dem Wassergehalt  $w$  und der Trockendichte  $\rho_d$  (Rusu, 2014)

Die Gleichung 23 wurde in das Excel-Sheet für die Ganglinie des Wassergehalts eingegeben, in dem die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  berechnet und die Ganglinie der Wärmeleitfähigkeit erstellt wurde.

Da die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eine Funktion des Wassergehalts  $w$  ist, wurde diese auch in Form einer Ganglinie dargestellt (siehe Abb. 49).

Der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit ähnelt jenem des Wassergehalts sehr.

In der Phase „Nullmessung“ nahm die Wärmeleitfähigkeit langsam ab (von 1,18 auf 1,16 W/mK). Der Verlauf ist linear.

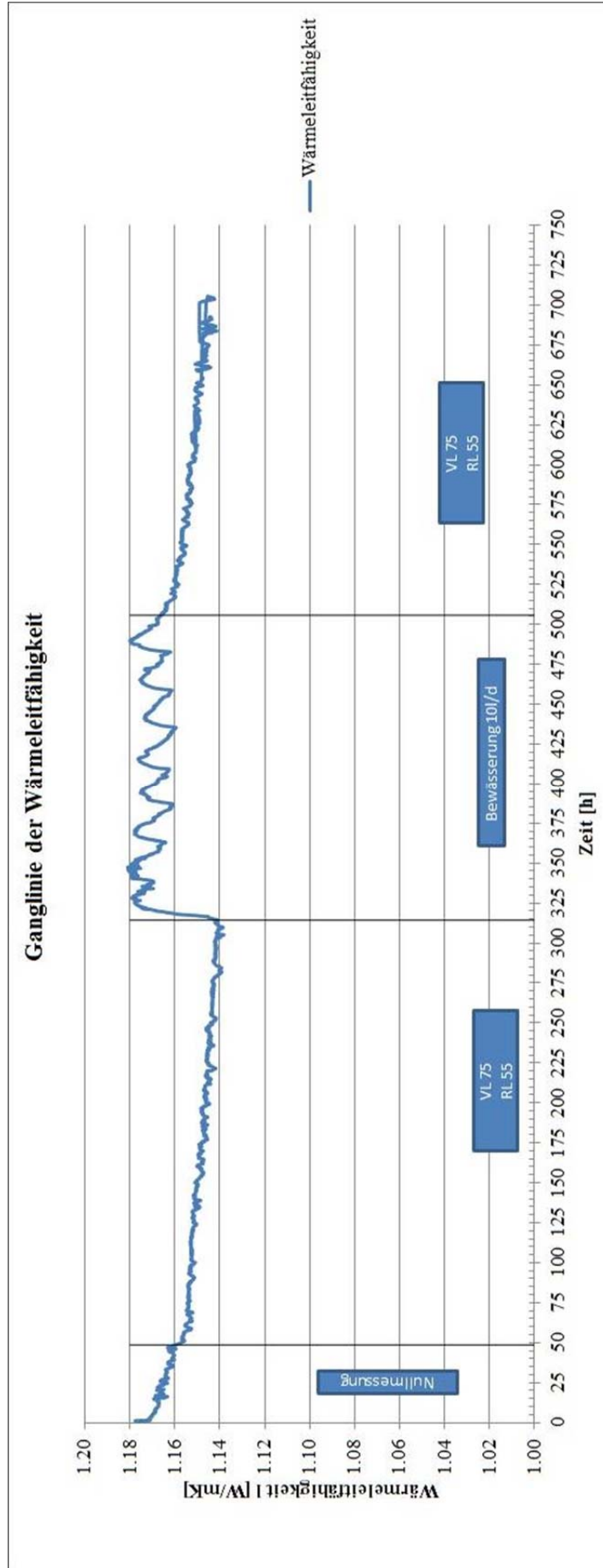
In der Phase 2 nahm er wieder langsam und linear ab, und zwar sank er von 1,16 auf 1,14 W/mK.

In der Phase mit Bewässerung, mit je 10 Litern pro Tag, verhielt sich der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit wie der Verlauf des Wassergehalts. Aufgrund der Bewässerung kam es zu Beginn zu einem leichten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Anschließend nahm dieser periodisch ab und zu.

In der letzten Phase nahm die Wärmeleitfähigkeit wieder linear ab.

Diese Ganglinie ist auch im Anhang 7.6 zu sehen.





**Abb. 49:** Ganglinie der Wärmeleitfähigkeit

## 6 Erkenntnisse und Ausblick

Ziel dieser Masterarbeit war es, zu untersuchen, wie schnell Thermosand bei einer bestimmten Temperatur rund um die Fernwärmerohre austrocknet. Aus diesem Grund musste zunächst die Wärmeleitfähigkeit des Thermosands ermittelt werden.

Zu diesem Zweck wurden die jeweiligen Messungen der Temperatur und des Wassergehalts durchgeführt. Sämtliche Messungen wurden in Form von Ganglinien grafisch veranschaulicht. Für die relevanten Zeitpunkte, die in den Ganglinien abgebildet sind, wurden auch Querschnitte in Form von Temperatur- und Wassergehaltsprofilen erstellt.

Insgesamt konnte im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit Folgendes gezeigt werden:

- Die Messung des Wassergehalts mittels der TDR-Methode ist materialspezifisch. Deswegen ist es wichtig, vor der Messung eine materialspezifische Kalibrierung der TDR-Sonden durchzuführen. Aus dem Unterkapitel 3.3.2 geht klar hervor, dass die Ergebnisse der Wassergehaltsmessung des Thermosands mittels der TDR-Sonden deutlich von den Ergebnissen der Wassergehaltsmessung mittels der Ofentrocknung abweichen. Um die TDR-Messung mit der Ofentrocknung auszugleichen, war es notwendig, die Korrekturfaktoren zu bestimmen.
- Um die dichteste Lagerung während des Einbaus des Thermosands sicherzustellen, war es notwendig, den Thermosand einzuschlämmen. Nachdem der Versuch eingebaut wurde, betrug der Wassergehalt im Thermosand ca. 30 %. Während der Messung bei einer Temperatur von 75 °C im Vorlaufrohr bzw. 55 °C im Rücklaufrohr zeigte der Thermosand nur eine sehr langsame Austrocknung.
- In der Phase 3 des Versuchs wurde der Thermosand täglich mit 10 Litern Wasser bewässert. Diese Bewässerung zeigte keinen Einfluss auf die Temperatur. Die Temperatur blieb also sowohl während dieser Phase als auch während des gesamten Versuchs konstant.
- Je weiter der Fühler von den Rohren entfernt ist, desto mehr Schwankungen gibt es in seinem Temperaturverlauf. Bei den Fühlern 0 bis 4 gab es beispielsweise fast keine Schwankungen. Bei den Fühlern 5 bis 7 sind diese Schwankungen hingegen deutlicher. Der Grund dafür liegt darin, dass die Raumtemperatur Einfluss auf die Fühler 5 bis 7 hatte.

- Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist sowohl von dem Wassergehalt  $w$  als auch von der Trockendichte  $\rho_d$  stark abhängig. Dieser Zusammenhang wurde auch von Diana Rusu in ihrer Masterarbeit gezeigt und bestätigt (Rusu, 2014).

Die Wärmeleitfähigkeitsbestimmung, die in dieser Masterarbeit durchgeführt wurde, zeitigte bereits wesentlich verlässlichere Daten als jene, die im Rahmen der Masterarbeit von Rainer Wenigmann (Wenigmann, 2011), die das Ziel verfolgte die Wärmeleitfähigkeit analytisch zu bestimmen, gewonnen wurden. Solche Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen erfordern allerdings äußerst genauen Daten vom Wassergehalt, da die Wärmeleitfähigkeit stark von diesem abhängig ist.

Das TDR-Messsystem LOM/8/mps von der Firma EASY TEST aus Berlin, das im Zuge dieses Versuchs zum Einsatz kam, ist eher veraltet und sollte daher nicht mehr für Messungen herangezogen werden. Aus diesem Grund sind auch die Ergebnisse der TDR-Messung eher ungenau bzw. konnten nur Annäherungswerte ermittelt bzw. gemessen werden.

Für genauere Ergebnisse und Werte der Wärmeleitfähigkeit bedarf es auch genauerer Ergebnisse des Wassergehalts. Daher wäre es für eventuelle zukünftige Versuche ratsam, diesen Versuch mit einem neuen TDR-Messsystem zu wiederholen. Dafür müsste auch ein zeitgemäßes, genaues und verlässliches TDR-Messsystem identifiziert und verwendet werden.

**Literaturverzeichnis**

Baehr, H.D., Stephan, K. (2013)

Wärme- und Stoffübertragung. 8. Auflage, Springer Verlag.

Fa. Kekelit

<http://www.kekelit.com/>

Fa. TeKa

<http://www.te-ka.de/>

Henögl, O. (2006)

Bodenmechanische Eignung und thermische Vorteile eines neuartigen Bettungssandes für Fernwärmeleitungen 5. Kolloquium, Bauen im Boden und Fels, Tagungshandbuch 2006

Kammerer, G. (2000)

Experimentelle Untersuchungen von Strömungsvorgängen in teilgesättigten Böden und in Spritzbetonrissen in Hinblick auf den Einsatz von Druckluft zur Wasserhaltung im Tunnelbau. Gruppe Geotechnik Graz, Heft 8: 77-83

Malicki, M.A.; Skierucha, W.M. (1989)

A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps risetime needlepulse. Irrigation Science 10: 153-163

Maxwell, J.C. (1873)

Treatise on Electricity and Magnetism. Clarendon Press, Oxford, UK.

Müller, W., Schönbauer, R., Simperl, K. (2005)

Heizsysteme & Warmwasser. Herausgegeben von Verein für Konsumenteninformation (VKI), Wien, Österreich

ÖNORM EN 13941 (Januar 2011)

Auslegung und Installation von werksmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für die Fernwärme, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Rost, A. (1978)

Messung dielektrischer Stoffeigenschaften. 1. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig

Rusu, D. (2014)

Thermal Properties of Soils – Theory, Calculations, Applications and Measurement. Master Thesis Realized at the Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering at Graz University of Technology

Scheid, Y. (2000)

Wassergehaltsbestimmung an Böden mit der TDR-Technik, Institut für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz.

Schmidt, H. H., Buchmaier, R. F., Vogt – Breyer, C. (2013)

Grundlagen der Geotechnik, 4. Auflage, Springer Verlag

Schmitz, K. W., Schaumann, G. (2003)

Kraft – Wärme – Kopplung. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag.

Semprich, S., Henögl, O. (2013)

Forschungsprojekt Thermosand, Bericht und Attest zur Eignungsprüfung im Labor. Institut für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz.

Smolczyk, U. (1995)

Grundbau – Taschenbuch, 5. Auflage Teil 1, Ernst & Sohn Verlag

Stacheder, M. (1996)

Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik, Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport. Schriftenreihe Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe, Heft 40.

Topp, G.C.; Davis, J.L.; Annan, A.P. (1980)

Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research 16, No. 3: 574-582

von Böckh, P., Wetzels, T. (2013)

Wärmeübertragung. 5. Auflage, Springer Verlag.

Wenigmann, R. (2011)

Versuche im Technikumsmaßstab zur Untersuchung der Austrocknungsvorgänge in Bettungsmaterialien rund um Fernwärmeleitungen. Diplomarbeit am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz.

## **7 Anhang**

### **7.1 Rohdaten der Temperaturmessung (Auszug)**



-										
4,316021E+0										
8 Null	0 °C Null	0 °C Null	0 °C Null	0 °C Null	0 °C Null	0 °C Null	0 °C Null	0 °C Null	0 °C Null	0 °C Null
-										
4,316021E+0										
8 Tara	0 °C Tara	0 °C Tara	0 °C Tara	0 °C Tara	0 °C Tara	0 °C Tara	0 °C Tara	0 °C Tara	0 °C Tara	0 °C Tara
	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C
0 Software-Null	Software-Null	Software-Null	Software-Null	Software-Null	Software-Null	Software-Null	Software-Null	Software-Null	Software-Null	Software-Null
k Faktor = -										
4,316021E+0										
8	k Faktor = 0	k Faktor = 0	k Faktor = 0	k Faktor = 0	k Faktor = 0	k Faktor = 0	k Faktor = 0	k Faktor = 0	k Faktor = 0	k Faktor = 0
Brückenfakto										
r = -										
4,316021E+0	Brückenfakto	Brückenfakto	Brückenfakto	Brückenfakto	Brückenfakto	Brückenfakto	Brückenfakto	Brückenfakto	Brückenfakto	Brückenfakto
8	r = 0	r = 0	r = 0	r = 0	r = 0	r = 0	r = 0	r = 0	r = 0	r = 0
Software	Software	Software	Software	Software	Software	Software	Software	Software	Software	Software
Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:	Skalierung:
Keine	Keine	Keine	Keine	Keine	Keine	Keine	Keine	Keine	Keine	Keine
Sensor: Kein	Sensor: HBM	Sensor: HBM	Sensor: HBM	Sensor: HBM	Sensor: HBM	Sensor: HBM	Sensor: HBM	Sensor: HBM	Sensor: HBM	Sensor: HBM
Sensor T-ID:	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Sensor T-ID:	0000000000	0000000000	0000000000	0000000000	0000000000	0000000000	0000000000	0000000000	0000000000	0000000000
Keine	000003	000003	000003	000003	000003	000003	000003	000003	000003	000003
Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur	Kabellängenkorrektur
Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
	0	54,56	58,75	68,35	72,59	47,38	38,98	30,29	34,32	25,08
1,000	54,56	58,75	68,34	72,59	47,38	38,98	30,28	34,32	34,32	25,07
2,000	54,57	58,77	68,35	72,59	47,38	38,99	30,29	34,32	34,32	25,05
3,000	54,58	58,80	68,37	72,60	47,38	38,98	30,29	34,32	34,32	25,05
4,000	54,58	58,82	68,38	72,61	47,38	38,98	30,29	34,32	34,32	25,04
5,000	54,59	58,83	68,39	72,61	47,37	38,97	30,29	34,32	34,32	25,03
6,000	54,59	58,84	68,39	72,61	47,36	38,96	30,28	34,32	34,32	25,03
7,000	54,59	58,84	68,38	72,61	47,35	38,94	30,28	34,31	34,31	25,02
8,000	54,59	58,84	68,38	72,60	47,34	38,93	30,28	34,31	34,31	25,02
9,000	54,58	58,83	68,38	72,60	47,33	38,92	30,28	34,31	34,31	25,03
10,00	54,58	58,83	68,37	72,60	47,33	38,92	30,28	34,31	34,31	25,03
11,00	54,57	58,82	68,37	72,60	47,32	38,92	30,29	34,32	34,32	25,03
12,00	54,57	58,82	68,38	72,60	47,33	38,92	30,29	34,33	34,33	25,04
13,00	54,57	58,82	68,38	72,60	47,33	38,92	30,30	34,33	34,33	25,04
14,00	54,56	58,81	68,39	72,61	47,34	38,93	30,30	34,34	34,34	25,03
15,00	54,56	58,81	68,39	72,61	47,34	38,93	30,31	34,35	34,35	25,03
16,00	54,56	58,81	68,40	72,62	47,34	38,94	30,33	34,36	34,36	25,03
17,00	54,56	58,81	68,40	72,62	47,35	38,95	30,34	34,37	34,37	25,03
18,00	54,56	58,81	68,40	72,62	47,37	38,96	30,35	34,38	34,38	25,04
19,00	54,57	58,82	68,41	72,62	47,38	38,97	30,36	34,39	34,39	25,04
20,00	54,57	58,82	68,41	72,62	47,38	38,98	30,37	34,40	34,40	25,04
21,00	54,57	58,83	68,40	72,62	47,38	38,97	30,36	34,39	34,39	25,04
22,00	54,57	58,82	68,40	72,62	47,37	38,96	30,35	34,38	34,38	25,04
23,00	54,57	58,82	68,39	72,61	47,35	38,94	30,34	34,37	34,37	25,03
24,00	54,56	58,81	68,38	72,60	47,33	38,92	30,32	34,35	34,35	25,03
25,00	54,55	58,80	68,37	72,59	47,32	38,91	30,31	34,34	34,34	25,03
26,00	54,55	58,80	68,36	72,58	47,31	38,90	30,31	34,34	34,34	25,03
27,00	54,54	58,79	68,36	72,58	47,31	38,90	30,30	34,33	34,33	25,04
28,00	54,54	58,79	68,36	72,58	47,31	38,90	30,30	34,33	34,33	25,04
29,00	54,54	58,79	68,37	72,58	47,32	38,91	30,30	34,33	34,33	25,05
30,00	54,54	58,79	68,37	72,59	47,33	38,92	30,30	34,33	34,33	25,05
31,00	54,54	58,79	68,38	72,60	47,34	38,93	30,30	34,33	34,33	25,05
32,00	54,54	58,79	68,39	72,61	47,34	38,93	30,29	34,32	34,32	25,05
33,00	54,54	58,79	68,39	72,61	47,34	38,93	30,29	34,32	34,32	25,05
34,00	54,54	58,80	68,39	72,61	47,35	38,94	30,30	34,33	34,33	25,05



35,00	54,55	58,80	68,39	72,61	47,35	38,94	30,31	34,34	25,05
36,00	54,55	58,80	68,39	72,61	47,36	38,95	30,33	34,36	25,05
37,00	54,55	58,80	68,38	72,60	47,36	38,95	30,34	34,38	25,06
38,00	54,55	58,80	68,37	72,59	47,37	38,96	30,36	34,39	25,07
39,00	54,54	58,80	68,36	72,59	47,36	38,95	30,36	34,39	25,08
40,00	54,54	58,79	68,36	72,58	47,35	38,94	30,36	34,39	25,08
41,00	54,54	58,79	68,36	72,58	47,34	38,94	30,35	34,39	25,09
42,00	54,54	58,79	68,36	72,58	47,34	38,93	30,35	34,38	25,10
43,00	54,54	58,79	68,37	72,59	47,34	38,93	30,34	34,37	25,10
44,00	54,54	58,79	68,38	72,60	47,34	38,93	30,34	34,37	25,10
45,00	54,54	58,79	68,38	72,61	47,34	38,93	30,34	34,38	25,11
46,00	54,53	58,79	68,39	72,61	47,34	38,93	30,35	34,38	25,11
47,00	54,54	58,79	68,39	72,61	47,33	38,93	30,35	34,38	25,11
48,00	54,54	58,79	68,39	72,62	47,33	38,92	30,34	34,37	25,11
49,00	54,54	58,80	68,39	72,62	47,32	38,91	30,34	34,37	25,11
50,00	54,55	58,80	68,39	72,61	47,31	38,90	30,32	34,35	25,11
51,00	54,55	58,80	68,38	72,61	47,30	38,89	30,31	34,34	25,11
52,00	54,55	58,81	68,38	72,60	47,30	38,89	30,30	34,33	25,10
53,00	54,55	58,81	68,37	72,59	47,30	38,89	30,29	34,32	25,10
54,00	54,55	58,80	68,37	72,59	47,30	38,89	30,28	34,31	25,10
55,00	54,55	58,80	68,36	72,58	47,30	38,89	30,28	34,31	25,10
56,00	54,54	58,79	68,35	72,57	47,29	38,88	30,28	34,31	25,09
57,00	54,53	58,78	68,35	72,57	47,29	38,88	30,27	34,30	25,09
58,00	54,53	58,78	68,35	72,57	47,29	38,88	30,27	34,30	25,10
59,00	54,52	58,78	68,35	72,57	47,30	38,89	30,27	34,30	25,10
60,00	54,53	58,78	68,35	72,58	47,31	38,90	30,27	34,30	25,10
61,00	54,53	58,78	68,36	72,59	47,32	38,91	30,27	34,30	25,10
62,00	54,54	58,79	68,37	72,59	47,34	38,93	30,27	34,30	25,10
63,00	54,55	58,79	68,38	72,60	47,36	38,95	30,28	34,31	25,09
64,00	54,55	58,80	68,39	72,61	47,37	38,96	30,29	34,32	25,08
65,00	54,55	58,80	68,39	72,61	47,38	38,97	30,29	34,33	25,07
66,00	54,55	58,80	68,39	72,61	47,37	38,96	30,30	34,33	25,07
67,00	54,55	58,80	68,39	72,61	47,36	38,95	30,30	34,34	25,06
68,00	54,54	58,79	68,38	72,60	47,34	38,93	30,31	34,34	25,06
69,00	54,54	58,79	68,38	72,60	47,33	38,92	30,31	34,35	25,06
70,00	54,53	58,79	68,37	72,60	47,32	38,91	30,32	34,35	25,06
71,00	54,53	58,79	68,37	72,59	47,31	38,90	30,32	34,36	25,06
72,00	54,53	58,79	68,37	72,60	47,31	38,90	30,32	34,36	25,06
73,00	54,54	58,79	68,37	72,60	47,32	38,91	30,33	34,36	25,06
74,00	54,55	58,80	68,37	72,60	47,34	38,93	30,33	34,36	25,06
75,00	54,56	58,81	68,38	72,60	47,35	38,94	30,33	34,36	25,07
76,00	54,56	58,82	68,37	72,60	47,35	38,94	30,32	34,35	25,07
77,00	54,56	58,82	68,37	72,59	47,36	38,95	30,32	34,35	25,08
78,00	54,56	58,82	68,37	72,59	47,35	38,94	30,32	34,35	25,08
79,00	54,56	58,81	68,36	72,58	47,34	38,93	30,32	34,35	25,08
80,00	54,55	58,80	68,36	72,58	47,33	38,92	30,32	34,35	25,07
81,00	54,54	58,80	68,36	72,57	47,32	38,91	30,31	34,34	25,06
82,00	54,55	58,80	68,36	72,58	47,31	38,91	30,32	34,34	25,05
83,00	54,55	58,81	68,37	72,58	47,32	38,92	30,32	34,35	25,04
84,00	54,56	58,81	68,37	72,59	47,34	38,93	30,33	34,36	25,04
85,00	54,56	58,82	68,38	72,59	47,35	38,95	30,34	34,36	25,04
86,00	54,56	58,82	68,38	72,59	47,37	38,96	30,35	34,37	25,05
87,00	54,56	58,82	68,38	72,59	47,38	38,97	30,35	34,38	25,05
88,00	54,56	58,81	68,38	72,59	47,38	38,97	30,35	34,38	25,06
89,00	54,55	58,80	68,37	72,59	47,37	38,96	30,35	34,38	25,06
90,00	54,55	58,80	68,37	72,58	47,36	38,95	30,34	34,37	25,06
91,00	54,55	58,80	68,36	72,57	47,35	38,94	30,33	34,36	25,05
92,00	54,55	58,80	68,36	72,57	47,35	38,94	30,32	34,36	25,05
93,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,35	38,94	30,32	34,35	25,05
94,00	54,56	58,82	68,36	72,57	47,36	38,95	30,32	34,35	25,05
95,00	54,57	58,82	68,37	72,57	47,37	38,96	30,32	34,36	25,05
96,00	54,57	58,83	68,37	72,58	47,39	38,97	30,33	34,36	25,05
97,00	54,57	58,83	68,38	72,59	47,39	38,98	30,33	34,36	25,06
98,00	54,57	58,82	68,39	72,60	47,39	38,98	30,32	34,36	25,06
99,00	54,57	58,82	68,39	72,60	47,38	38,97	30,32	34,35	25,06

100,00	54,56	58,81	68,39	72,60	47,37	38,96	30,31	34,34	25,07
101,00	54,56	58,81	68,38	72,59	47,36	38,95	30,31	34,34	25,07
102,00	54,56	58,81	68,37	72,58	47,36	38,94	30,31	34,34	25,07
103,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,35	38,94	30,31	34,34	25,07
104,00	54,56	58,81	68,36	72,56	47,35	38,94	30,31	34,34	25,07
105,00	54,56	58,81	68,35	72,56	47,35	38,94	30,31	34,34	25,07
106,00	54,56	58,81	68,35	72,56	47,35	38,94	30,31	34,34	25,07
107,00	54,56	58,82	68,36	72,56	47,36	38,94	30,30	34,33	25,06
108,00	54,57	58,82	68,36	72,56	47,35	38,94	30,30	34,33	25,06
109,00	54,57	58,82	68,36	72,57	47,35	38,94	30,29	34,32	25,05
110,00	54,57	58,82	68,37	72,57	47,36	38,95	30,29	34,32	25,04
111,00	54,56	58,82	68,37	72,57	47,36	38,95	30,29	34,32	25,04
112,00	54,56	58,82	68,37	72,57	47,37	38,96	30,30	34,33	25,05
113,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,37	38,96	30,30	34,33	25,05
114,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,37	38,97	30,31	34,34	25,05
115,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,38	38,97	30,31	34,34	25,05
116,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,37	38,97	30,31	34,34	25,05
117,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,37	38,96	30,32	34,35	25,04
118,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,37	38,96	30,32	34,35	25,04
119,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,37	38,96	30,32	34,35	25,04
120,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,37	38,96	30,33	34,36	25,04
121,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,37	38,96	30,33	34,36	25,04
122,00	54,56	58,82	68,37	72,57	47,37	38,96	30,33	34,36	25,05
123,00	54,56	58,82	68,37	72,57	47,37	38,96	30,33	34,35	25,05
124,00	54,56	58,82	68,38	72,57	47,36	38,95	30,32	34,35	25,05
125,00	54,56	58,81	68,38	72,57	47,36	38,94	30,31	34,34	25,05
126,00	54,56	58,81	68,38	72,57	47,35	38,94	30,31	34,34	25,05
127,00	54,56	58,81	68,38	72,57	47,34	38,93	30,30	34,34	25,05
128,00	54,55	58,80	68,37	72,57	47,34	38,93	30,30	34,33	25,04
129,00	54,55	58,80	68,37	72,57	47,33	38,92	30,31	34,34	25,04
130,00	54,54	58,80	68,36	72,57	47,33	38,92	30,31	34,34	25,04
131,00	54,54	58,79	68,36	72,56	47,33	38,93	30,32	34,35	25,04
132,00	54,54	58,79	68,36	72,56	47,34	38,93	30,33	34,35	25,05
133,00	54,55	58,80	68,36	72,56	47,34	38,93	30,33	34,36	25,05
134,00	54,55	58,80	68,36	72,56	47,35	38,94	30,33	34,36	25,06
135,00	54,55	58,81	68,36	72,57	47,35	38,94	30,34	34,37	25,06
136,00	54,56	58,81	68,37	72,57	47,35	38,94	30,34	34,37	25,06
137,00	54,56	58,81	68,37	72,57	47,34	38,93	30,33	34,36	25,06
138,00	54,56	58,81	68,37	72,57	47,34	38,93	30,33	34,36	25,06
139,00	54,56	58,81	68,37	72,57	47,34	38,93	30,33	34,36	25,06
140,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,34	38,94	30,33	34,36	25,06
141,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,35	38,94	30,33	34,36	25,07
142,00	54,56	58,81	68,36	72,56	47,35	38,94	30,33	34,36	25,07
143,00	54,56	58,81	68,36	72,56	47,34	38,94	30,33	34,36	25,07
144,00	54,56	58,81	68,36	72,56	47,34	38,94	30,32	34,35	25,07
145,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,34	38,93	30,32	34,35	25,06
146,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,33	38,93	30,32	34,35	25,06
147,00	54,55	58,80	68,36	72,57	47,33	38,92	30,31	34,34	25,05
148,00	54,54	58,79	68,37	72,58	47,33	38,92	30,31	34,34	25,04
149,00	54,53	58,79	68,37	72,58	47,33	38,92	30,32	34,35	25,03
150,00	54,53	58,79	68,38	72,59	47,34	38,93	30,32	34,35	25,03
151,00	54,53	58,78	68,38	72,59	47,35	38,94	30,33	34,36	25,03
152,00	54,53	58,79	68,37	72,59	47,35	38,95	30,34	34,37	25,04
153,00	54,54	58,79	68,37	72,58	47,36	38,95	30,34	34,38	25,04
154,00	54,54	58,79	68,36	72,57	47,36	38,95	30,35	34,38	25,05
155,00	54,54	58,80	68,35	72,56	47,36	38,95	30,35	34,38	25,05
156,00	54,55	58,80	68,35	72,55	47,35	38,94	30,35	34,38	25,05
157,00	54,55	58,80	68,34	72,55	47,35	38,94	30,35	34,38	25,05
158,00	54,56	58,81	68,34	72,55	47,34	38,93	30,34	34,37	25,05
159,00	54,56	58,82	68,34	72,55	47,34	38,93	30,33	34,36	25,04
160,00	54,57	58,82	68,35	72,56	47,34	38,93	30,33	34,36	25,04
161,00	54,58	58,83	68,36	72,56	47,33	38,93	30,32	34,36	25,04
162,00	54,58	58,83	68,36	72,57	47,33	38,92	30,32	34,35	25,05
163,00	54,58	58,83	68,36	72,57	47,33	38,92	30,32	34,35	25,05
164,00	54,58	58,83	68,36	72,57	47,32	38,91	30,31	34,35	25,05

165,00	54,57	58,82	68,36	72,57	47,31	38,90	30,31	34,34	25,05
166,00	54,56	58,82	68,35	72,57	47,30	38,89	30,31	34,34	25,05
167,00	54,56	58,81	68,35	72,56	47,30	38,89	30,30	34,33	25,05
168,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,31	38,89	30,29	34,32	25,04
169,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,32	38,90	30,29	34,32	25,04
170,00	54,57	58,82	68,37	72,57	47,33	38,92	30,29	34,32	25,04
171,00	54,57	58,82	68,37	72,58	47,34	38,93	30,29	34,32	25,04
172,00	54,58	58,83	68,38	72,58	47,34	38,93	30,29	34,32	25,04
173,00	54,59	58,84	68,38	72,59	47,34	38,93	30,30	34,33	25,05
174,00	54,59	58,84	68,38	72,58	47,34	38,93	30,31	34,34	25,05
175,00	54,59	58,84	68,37	72,58	47,33	38,92	30,31	34,34	25,05
176,00	54,59	58,84	68,37	72,58	47,32	38,91	30,32	34,35	25,05
177,00	54,59	58,83	68,36	72,57	47,32	38,91	30,32	34,35	25,06
178,00	54,58	58,83	68,36	72,57	47,31	38,90	30,32	34,34	25,06
179,00	54,57	58,82	68,35	72,56	47,30	38,89	30,31	34,34	25,06
180,00	54,55	58,81	68,35	72,56	47,30	38,89	30,30	34,34	25,06
181,00	54,54	58,80	68,35	72,56	47,30	38,89	30,30	34,33	25,07
182,00	54,54	58,79	68,35	72,56	47,30	38,89	30,31	34,34	25,07
183,00	54,53	58,78	68,36	72,57	47,31	38,91	30,31	34,34	25,08
184,00	54,53	58,78	68,37	72,58	47,33	38,92	30,32	34,35	25,09
185,00	54,54	58,78	68,38	72,58	47,34	38,94	30,34	34,37	25,10
186,00	54,54	58,79	68,39	72,59	47,36	38,95	30,35	34,37	25,11
187,00	54,55	58,80	68,39	72,59	47,37	38,96	30,35	34,38	25,12
188,00	54,55	58,80	68,39	72,59	47,38	38,96	30,35	34,38	25,12
189,00	54,56	58,81	68,39	72,59	47,38	38,96	30,35	34,38	25,12
190,00	54,56	58,81	68,38	72,59	47,37	38,96	30,35	34,38	25,12
191,00	54,56	58,81	68,38	72,58	47,36	38,95	30,34	34,37	25,12
192,00	54,55	58,81	68,38	72,58	47,35	38,94	30,33	34,36	25,11
193,00	54,55	58,80	68,38	72,58	47,34	38,93	30,33	34,36	25,11
194,00	54,55	58,80	68,38	72,58	47,34	38,93	30,32	34,35	25,11
195,00	54,55	58,80	68,38	72,58	47,34	38,93	30,32	34,35	25,11
196,00	54,56	58,81	68,38	72,58	47,34	38,93	30,32	34,35	25,11
197,00	54,57	58,82	68,38	72,58	47,35	38,94	30,33	34,36	25,10
198,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,36	38,95	30,33	34,36	25,10
199,00	54,59	58,84	68,39	72,60	47,36	38,95	30,34	34,37	25,09
200,00	54,59	58,85	68,40	72,61	47,37	38,96	30,34	34,37	25,09
201,00	54,60	58,85	68,41	72,62	47,37	38,97	30,34	34,38	25,08
202,00	54,60	58,85	68,41	72,63	47,37	38,97	30,35	34,38	25,08
203,00	54,60	58,85	68,41	72,63	47,37	38,96	30,35	34,38	25,08
204,00	54,59	58,84	68,41	72,62	47,37	38,96	30,35	34,38	25,08
205,00	54,59	58,84	68,40	72,62	47,36	38,94	30,34	34,38	25,08
206,00	54,58	58,83	68,39	72,61	47,34	38,93	30,34	34,37	25,09
207,00	54,57	58,82	68,38	72,59	47,33	38,91	30,34	34,37	25,09
208,00	54,56	58,82	68,37	72,58	47,32	38,90	30,34	34,37	25,09
209,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,31	38,89	30,34	34,36	25,09
210,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,31	38,89	30,33	34,36	25,09
211,00	54,56	58,82	68,35	72,56	47,31	38,89	30,33	34,36	25,09
212,00	54,57	58,82	68,35	72,56	47,31	38,90	30,33	34,36	25,09
213,00	54,57	58,82	68,35	72,56	47,32	38,91	30,34	34,37	25,09
214,00	54,57	58,82	68,35	72,56	47,33	38,92	30,34	34,37	25,10
215,00	54,57	58,82	68,35	72,56	47,35	38,94	30,34	34,37	25,11
216,00	54,57	58,82	68,36	72,57	47,36	38,95	30,34	34,37	25,11
217,00	54,57	58,83	68,37	72,57	47,36	38,95	30,34	34,37	25,11
218,00	54,58	58,83	68,37	72,58	47,37	38,96	30,34	34,37	25,12
219,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,37	38,96	30,33	34,36	25,12
220,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,36	38,95	30,33	34,36	25,12
221,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,36	38,95	30,32	34,35	25,12
222,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,36	38,94	30,32	34,35	25,12
223,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,36	38,94	30,32	34,35	25,12
224,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,36	38,95	30,33	34,36	25,12
225,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,36	38,95	30,34	34,37	25,13
226,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,36	38,95	30,35	34,38	25,14
227,00	54,58	58,84	68,37	72,58	47,36	38,95	30,36	34,39	25,14
228,00	54,58	58,84	68,37	72,58	47,36	38,94	30,36	34,39	25,15
229,00	54,58	58,83	68,37	72,58	47,35	38,93	30,35	34,38	25,14

230,00	54,58	58,83	68,37	72,57	47,34	38,92	30,34	34,36	25,14
231,00	54,57	58,82	68,37	72,57	47,33	38,91	30,32	34,35	25,13
232,00	54,56	58,81	68,37	72,57	47,32	38,90	30,31	34,34	25,12
233,00	54,56	58,81	68,37	72,57	47,31	38,90	30,31	34,34	25,11
234,00	54,56	58,81	68,36	72,57	47,31	38,90	30,31	34,34	25,11
235,00	54,56	58,82	68,36	72,56	47,32	38,91	30,32	34,34	25,11
236,00	54,57	58,82	68,36	72,56	47,33	38,92	30,32	34,35	25,11
237,00	54,58	58,83	68,36	72,56	47,34	38,93	30,33	34,36	25,12
238,00	54,58	58,83	68,37	72,57	47,35	38,93	30,33	34,36	25,12
239,00	54,59	58,84	68,37	72,57	47,35	38,94	30,33	34,36	25,12
240,00	54,59	58,84	68,37	72,57	47,35	38,94	30,33	34,36	25,11
241,00	54,58	58,84	68,38	72,57	47,35	38,94	30,33	34,35	25,11
242,00	54,58	58,83	68,37	72,57	47,35	38,94	30,33	34,35	25,11
243,00	54,57	58,83	68,37	72,57	47,35	38,94	30,33	34,36	25,11
244,00	54,57	58,83	68,37	72,56	47,35	38,94	30,34	34,36	25,11
245,00	54,57	58,82	68,36	72,56	47,35	38,94	30,34	34,37	25,11
246,00	54,57	58,82	68,36	72,55	47,35	38,94	30,34	34,37	25,12
247,00	54,56	58,81	68,36	72,55	47,35	38,93	30,34	34,37	25,13
248,00	54,56	58,81	68,36	72,55	47,35	38,93	30,34	34,37	25,13
249,00	54,56	58,81	68,36	72,55	47,34	38,93	30,34	34,37	25,14
250,00	54,56	58,81	68,36	72,55	47,34	38,93	30,34	34,36	25,14
251,00	54,56	58,81	68,36	72,55	47,34	38,93	30,33	34,36	25,14
252,00	54,57	58,82	68,35	72,55	47,34	38,93	30,33	34,36	25,14
253,00	54,57	58,82	68,35	72,55	47,34	38,92	30,34	34,36	25,14
254,00	54,58	58,83	68,35	72,55	47,33	38,92	30,34	34,36	25,13
255,00	54,58	58,83	68,35	72,55	47,33	38,92	30,33	34,36	25,12
256,00	54,58	58,83	68,35	72,55	47,33	38,92	30,33	34,36	25,11
257,00	54,58	58,83	68,36	72,56	47,34	38,93	30,33	34,36	25,11
258,00	54,58	58,83	68,37	72,57	47,35	38,94	30,33	34,36	25,11
259,00	54,58	58,83	68,38	72,57	47,36	38,95	30,33	34,36	25,11
260,00	54,58	58,83	68,38	72,58	47,38	38,97	30,33	34,36	25,12
261,00	54,58	58,83	68,38	72,58	47,39	38,98	30,34	34,37	25,13
262,00	54,57	58,83	68,38	72,58	47,40	38,99	30,34	34,38	25,13
263,00	54,57	58,82	68,38	72,58	47,40	38,99	30,35	34,38	25,13
264,00	54,57	58,82	68,37	72,57	47,39	38,98	30,34	34,37	25,12
265,00	54,57	58,82	68,37	72,57	47,37	38,96	30,33	34,36	25,11
266,00	54,57	58,82	68,36	72,56	47,35	38,94	30,32	34,35	25,10
267,00	54,57	58,82	68,36	72,56	47,34	38,92	30,31	34,34	25,09
268,00	54,57	58,82	68,36	72,56	47,32	38,91	30,30	34,33	25,08
269,00	54,57	58,82	68,37	72,57	47,32	38,91	30,30	34,33	25,07
270,00	54,57	58,82	68,38	72,58	47,32	38,91	30,31	34,34	25,08
271,00	54,57	58,83	68,38	72,58	47,33	38,91	30,32	34,35	25,08
272,00	54,58	58,83	68,39	72,59	47,33	38,92	30,32	34,35	25,09
273,00	54,58	58,83	68,39	72,59	47,33	38,92	30,33	34,36	25,09
274,00	54,58	58,83	68,38	72,59	47,34	38,92	30,33	34,36	25,09
275,00	54,57	58,83	68,38	72,58	47,34	38,92	30,33	34,36	25,09
276,00	54,57	58,83	68,37	72,57	47,34	38,92	30,33	34,36	25,08
277,00	54,58	58,83	68,37	72,57	47,35	38,93	30,34	34,37	25,07
278,00	54,58	58,83	68,37	72,57	47,36	38,95	30,34	34,38	25,07
279,00	54,58	58,83	68,38	72,57	47,37	38,96	30,35	34,38	25,08
280,00	54,57	58,83	68,38	72,58	47,39	38,98	30,36	34,39	25,08
281,00	54,57	58,82	68,39	72,58	47,40	38,99	30,36	34,39	25,09
282,00	54,57	58,82	68,39	72,58	47,41	39,00	30,36	34,39	25,09
283,00	54,56	58,81	68,39	72,58	47,41	39,00	30,35	34,39	25,10
284,00	54,56	58,81	68,39	72,58	47,41	39,00	30,35	34,38	25,10
285,00	54,56	58,81	68,38	72,57	47,40	38,99	30,34	34,37	25,09
286,00	54,56	58,81	68,38	72,57	47,40	38,99	30,34	34,37	25,09
287,00	54,56	58,81	68,37	72,56	47,39	38,98	30,33	34,37	25,08
288,00	54,56	58,82	68,37	72,56	47,38	38,97	30,34	34,37	25,07
289,00	54,56	58,82	68,37	72,55	47,37	38,97	30,34	34,37	25,06
290,00	54,56	58,81	68,36	72,55	47,37	38,96	30,34	34,37	25,05
291,00	54,56	58,81	68,36	72,55	47,36	38,96	30,34	34,37	25,05
292,00	54,55	58,81	68,36	72,55	47,36	38,95	30,34	34,37	25,04
293,00	54,55	58,81	68,37	72,55	47,36	38,95	30,34	34,37	25,04
294,00	54,55	58,80	68,37	72,56	47,37	38,96	30,34	34,37	25,04

295,00	54,55	58,80	68,38	72,56	47,38	38,96	30,34	34,37	25,04
296,00	54,55	58,81	68,38	72,57	47,38	38,97	30,34	34,37	25,03
297,00	54,55	58,81	68,39	72,57	47,39	38,98	30,34	34,37	25,03
298,00	54,56	58,81	68,39	72,57	47,40	38,98	30,34	34,37	25,04
299,00	54,56	58,81	68,39	72,58	47,40	38,99	30,34	34,37	25,04
300,00	54,57	58,82	68,39	72,57	47,40	38,99	30,34	34,38	25,04

## **7.2 Rohdaten aus der Wassergehaltsmessung (Auszug)**

09-07-2014	17:02:42	00	13.63	23.5
09-07-2014	17:03:02	01	12.54	21.9
09-07-2014	17:03:21	02	17.68	28.9
09-07-2014	17:03:41	03	16.66	27.6
09-07-2014	17:04:00	04	15.89	26.6
09-07-2014	17:04:19	05	12.14	21.2
09-07-2014	17:04:39	06	16.20	27.0
09-07-2014	17:04:59	07	17.18	28.3
09-07-2014	17:12:42	00	13.63	23.5
09-07-2014	17:13:02	01	12.52	21.8
09-07-2014	17:13:21	02	17.68	28.9
09-07-2014	17:13:41	03	16.66	27.6
09-07-2014	17:14:00	04	15.94	26.7
09-07-2014	17:14:20	05	12.14	21.2
09-07-2014	17:14:40	06	16.22	27.0
09-07-2014	17:14:59	07	17.16	28.2
09-07-2014	17:22:42	00	13.63	23.5
09-07-2014	17:23:02	01	12.54	21.9
09-07-2014	17:23:21	02	17.65	28.9
09-07-2014	17:23:41	03	16.66	27.6
09-07-2014	17:24:00	04	15.94	26.7
09-07-2014	17:24:20	05	12.14	21.2
09-07-2014	17:24:39	06	16.22	27.0
09-07-2014	17:24:59	07	17.18	28.3
09-07-2014	17:32:42	00	13.63	23.5
09-07-2014	17:33:01	01	12.49	21.8
09-07-2014	17:33:21	02	17.68	28.9
09-07-2014	17:33:41	03	16.66	27.6

09-07-2014	17:34:00	04	15.94	26.7
09-07-2014	17:34:20	05	12.14	21.2
09-07-2014	17:34:39	06	16.22	27.0
09-07-2014	17:34:59	07	17.18	28.3
09-07-2014	17:42:42	00	13.66	23.5
09-07-2014	17:43:01	01	12.49	21.8
09-07-2014	17:43:21	02	17.68	28.9
09-07-2014	17:43:40	03	16.66	27.6
09-07-2014	17:44:00	04	15.94	26.7
09-07-2014	17:44:20	05	12.16	21.3
09-07-2014	17:44:39	06	16.20	27.0
09-07-2014	17:44:58	07	17.18	28.3
09-07-2014	17:52:42	00	13.66	23.5
09-07-2014	17:53:01	01	12.52	21.8
09-07-2014	17:53:21	02	17.68	28.9
09-07-2014	17:53:40	03	16.66	27.6
09-07-2014	17:54:00	04	15.96	26.7
09-07-2014	17:54:19	05	12.14	21.2
09-07-2014	17:54:39	06	16.22	27.0
09-07-2014	17:54:58	07	17.16	28.2
09-07-2014	18:02:41	00	13.68	23.5
09-07-2014	18:03:01	01	12.49	21.8
09-07-2014	18:03:20	02	17.71	28.9
09-07-2014	18:03:40	03	16.68	27.6
09-07-2014	18:03:59	04	15.94	26.7
09-07-2014	18:04:19	05	12.16	21.3
09-07-2014	18:04:38	06	16.22	27.0
09-07-2014	18:04:58	07	17.18	28.3



09-07-2014	18:12:41	00	13.66	23.5
09-07-2014	18:13:01	01	12.47	21.7
09-07-2014	18:13:20	02	17.68	28.9
09-07-2014	18:13:40	03	16.68	27.6
09-07-2014	18:13:59	04	15.94	26.7
09-07-2014	18:14:19	05	12.14	21.2
09-07-2014	18:14:38	06	16.22	27.0
09-07-2014	18:14:58	07	17.18	28.3
09-07-2014	18:22:41	00	13.66	23.5
09-07-2014	18:23:01	01	12.49	21.8
09-07-2014	18:23:20	02	17.68	28.9
09-07-2014	18:23:40	03	16.71	27.7
09-07-2014	18:23:59	04	15.94	26.7
09-07-2014	18:24:19	05	12.14	21.2
09-07-2014	18:24:38	06	16.22	27.0
09-07-2014	18:24:58	07	17.21	28.3
09-07-2014	18:32:41	00	13.66	23.5
09-07-2014	18:33:00	01	12.47	21.7
09-07-2014	18:33:20	02	17.71	28.9
09-07-2014	18:33:39	03	16.68	27.6
09-07-2014	18:33:59	04	15.96	26.7
09-07-2014	18:34:18	05	12.14	21.2
09-07-2014	18:34:38	06	16.22	27.0
09-07-2014	18:34:57	07	17.18	28.3
09-07-2014	18:42:41	00	13.66	23.5
09-07-2014	18:43:00	01	12.49	21.8
09-07-2014	18:43:20	02	17.71	28.9
09-07-2014	18:43:39	03	16.66	27.6

09-07-2014	18:43:59	04	15.96	26.7
09-07-2014	18:44:18	05	12.16	21.3
09-07-2014	18:44:38	06	16.22	27.0
09-07-2014	18:44:57	07	17.18	28.3
09-07-2014	18:52:40	00	13.66	23.5
09-07-2014	18:53:00	01	12.49	21.8
09-07-2014	18:53:19	02	17.68	28.9
09-07-2014	18:53:39	03	16.68	27.6
09-07-2014	18:53:58	04	15.94	26.7
09-07-2014	18:54:18	05	12.16	21.3
09-07-2014	18:54:38	06	16.22	27.0
09-07-2014	18:54:57	07	17.18	28.3
09-07-2014	19:02:40	00	13.68	23.5
09-07-2014	19:03:00	01	12.47	21.7
09-07-2014	19:03:19	02	17.68	28.9
09-07-2014	19:03:39	03	16.68	27.6
09-07-2014	19:03:58	04	15.94	26.7
09-07-2014	19:04:18	05	12.16	21.3
09-07-2014	19:04:37	06	16.22	27.0
09-07-2014	19:04:57	07	17.18	28.3
09-07-2014	19:12:40	00	13.68	23.5
09-07-2014	19:12:59	01	12.52	21.8
09-07-2014	19:13:19	02	17.68	28.9
09-07-2014	19:13:38	03	16.63	27.6
09-07-2014	19:13:57	04	15.91	26.6
09-07-2014	19:14:17	05	12.14	21.2
09-07-2014	19:14:36	06	16.22	27.0
09-07-2014	19:14:55	07	17.18	28.3

09-07-2014	19:22:39	00	13.66	23.5
09-07-2014	19:22:59	01	12.49	21.8
09-07-2014	19:23:18	02	17.65	28.9
09-07-2014	19:23:37	03	16.68	27.6
09-07-2014	19:23:57	04	15.96	26.7
09-07-2014	19:24:16	05	12.14	21.2
09-07-2014	19:24:36	06	16.20	27.0
09-07-2014	19:24:55	07	17.21	28.3
09-07-2014	19:32:40	00	13.68	23.5
09-07-2014	19:32:59	01	12.49	21.8
09-07-2014	19:33:19	02	17.74	29.0
09-07-2014	19:33:38	03	16.66	27.6
09-07-2014	19:33:58	04	15.96	26.7
09-07-2014	19:34:17	05	12.16	21.3
09-07-2014	19:34:37	06	16.20	27.0
09-07-2014	19:34:56	07	17.18	28.3
09-07-2014	19:42:39	00	13.66	23.5
09-07-2014	19:42:59	01	12.49	21.8
09-07-2014	19:43:18	02	17.68	28.9
09-07-2014	19:43:38	03	16.66	27.6
09-07-2014	19:43:57	04	15.94	26.7
09-07-2014	19:44:17	05	12.16	21.3
09-07-2014	19:44:36	06	16.20	27.0
09-07-2014	19:44:55	07	17.18	28.3
09-07-2014	19:52:39	00	13.66	23.5
09-07-2014	19:52:59	01	12.49	21.8
09-07-2014	19:53:18	02	17.71	28.9
09-07-2014	19:53:38	03	16.66	27.6

09-07-2014	19:53:57	04	15.94	26.7
09-07-2014	19:54:17	05	12.14	21.2
09-07-2014	19:54:37	06	16.20	27.0
09-07-2014	19:54:56	07	17.16	28.2
09-07-2014	20:02:39	00	13.66	23.5
09-07-2014	20:02:59	01	12.49	21.8
09-07-2014	20:03:18	02	17.68	28.9
09-07-2014	20:03:38	03	16.66	27.6
09-07-2014	20:03:57	04	15.94	26.7
09-07-2014	20:04:17	05	12.14	21.2
09-07-2014	20:04:36	06	16.20	27.0
09-07-2014	20:04:56	07	17.18	28.3
09-07-2014	20:12:39	00	13.71	23.6
09-07-2014	20:12:58	01	12.49	21.8
09-07-2014	20:13:18	02	17.68	28.9
09-07-2014	20:13:38	03	16.66	27.6
09-07-2014	20:13:57	04	15.94	26.7
09-07-2014	20:14:17	05	12.14	21.2
09-07-2014	20:14:36	06	16.20	27.0
09-07-2014	20:14:56	07	17.21	28.3
09-07-2014	20:22:38	00	13.66	23.5
09-07-2014	20:22:58	01	12.47	21.7
09-07-2014	20:23:18	02	17.71	28.9
09-07-2014	20:23:37	03	16.66	27.6
09-07-2014	20:23:57	04	15.96	26.7
09-07-2014	20:24:16	05	12.14	21.2
09-07-2014	20:24:36	06	16.20	27.0
09-07-2014	20:24:56	07	17.18	28.3

09-07-2014	20:32:38	00	13.66	23.5
09-07-2014	20:32:58	01	12.47	21.7
09-07-2014	20:33:17	02	17.68	28.9
09-07-2014	20:33:37	03	16.63	27.6
09-07-2014	20:33:56	04	15.94	26.7
09-07-2014	20:34:16	05	12.16	21.3
09-07-2014	20:34:36	06	16.20	27.0
09-07-2014	20:34:55	07	17.18	28.3
09-07-2014	20:42:38	00	13.66	23.5
09-07-2014	20:42:57	01	12.47	21.7
09-07-2014	20:43:17	02	17.68	28.9
09-07-2014	20:43:37	03	16.66	27.6
09-07-2014	20:43:56	04	15.96	26.7
09-07-2014	20:44:16	05	12.14	21.2
09-07-2014	20:44:35	06	16.22	27.0
09-07-2014	20:44:55	07	17.18	28.3
09-07-2014	20:52:38	00	13.66	23.5
09-07-2014	20:52:57	01	12.47	21.7
09-07-2014	20:53:17	02	17.71	28.9
09-07-2014	20:53:36	03	16.66	27.6
09-07-2014	20:53:56	04	15.94	26.7
09-07-2014	20:54:16	05	12.16	21.3
09-07-2014	20:54:35	06	16.20	27.0
09-07-2014	20:54:55	07	17.21	28.3

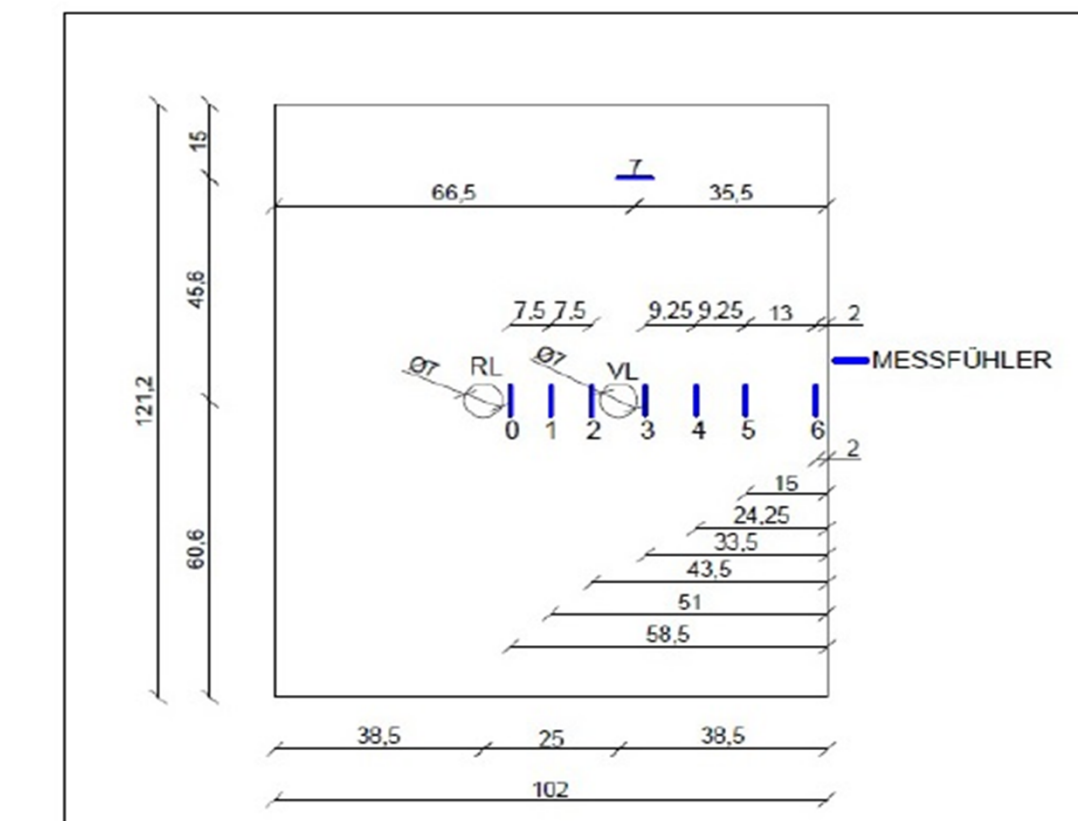
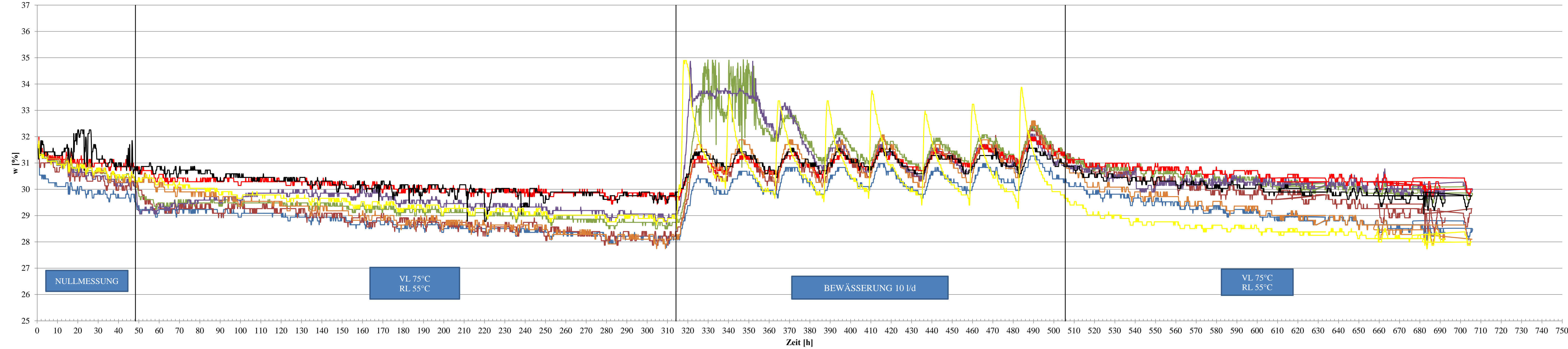
## **7.3 Ganglinie der Temperatur**



## **7.4 Ganglinie des Wassergehalts**



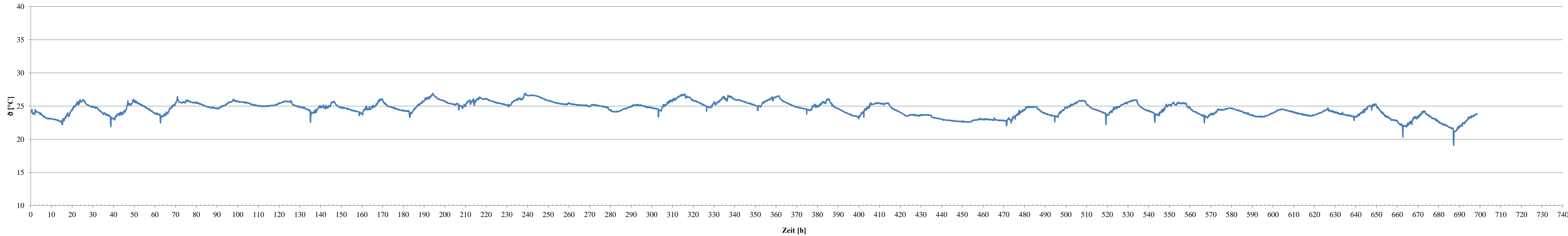
### Ganglinie des Wassergehalts



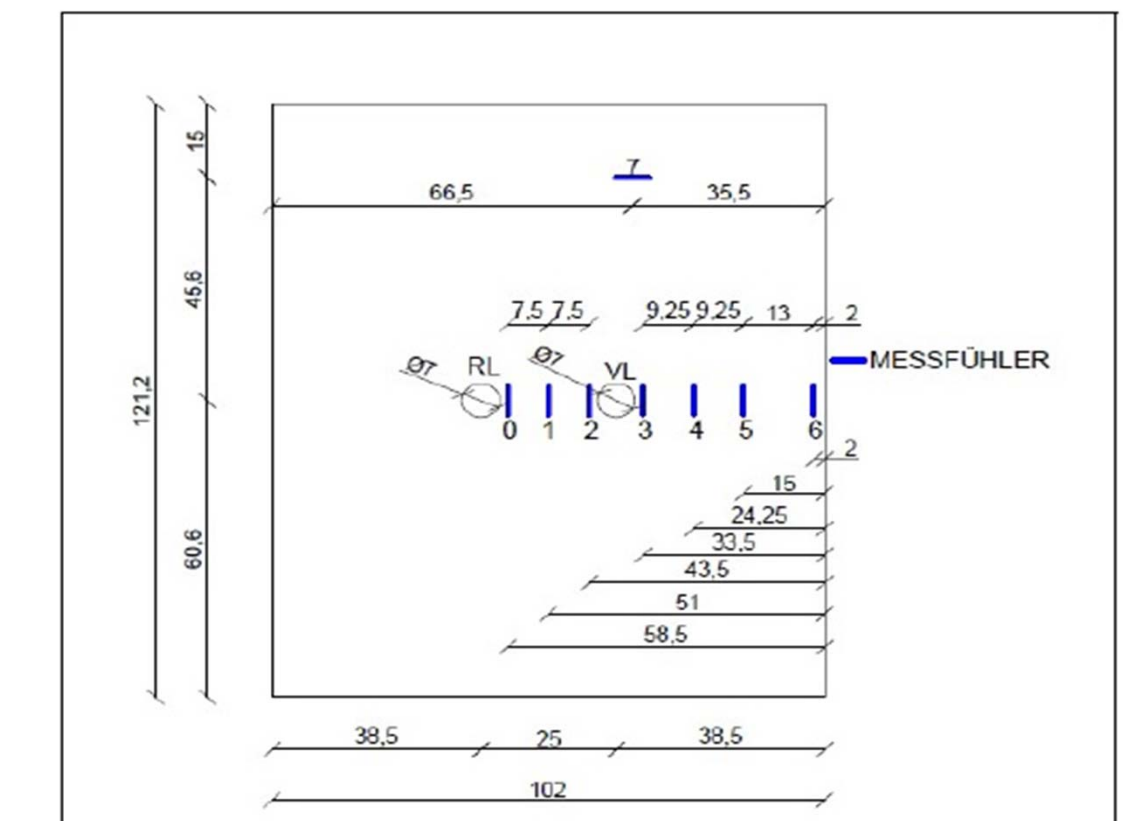
Auswertung der Wassergehaltsmessdaten	
Ganglinie	
Nikola Stanisljevic	
Datum: 26.09.2014	Plannummer: 2

## **7.5 Ganglinie der Raumtemperatur**

### Ganglinie der Raumtemperatur



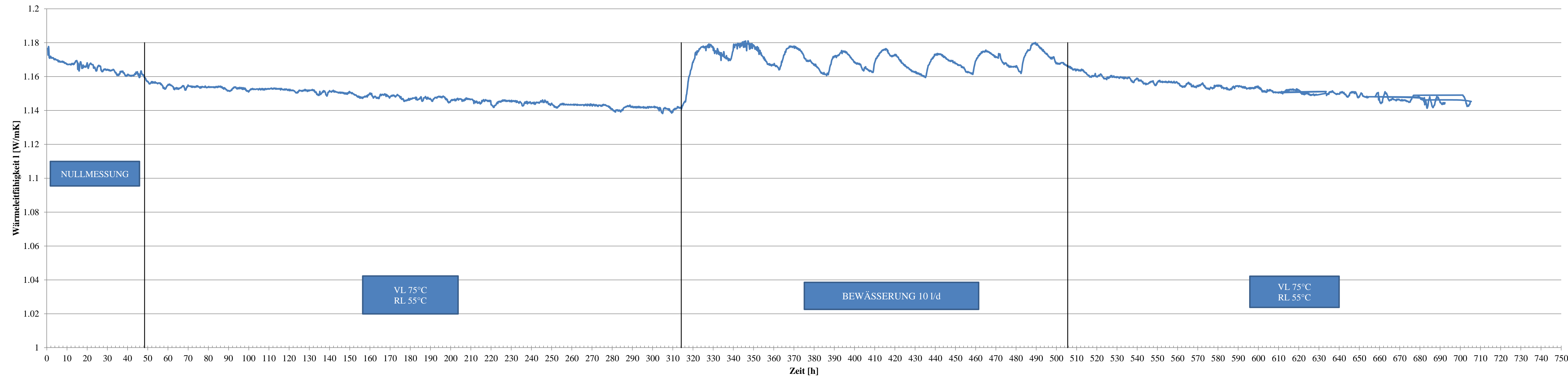
— Raumtemperatur



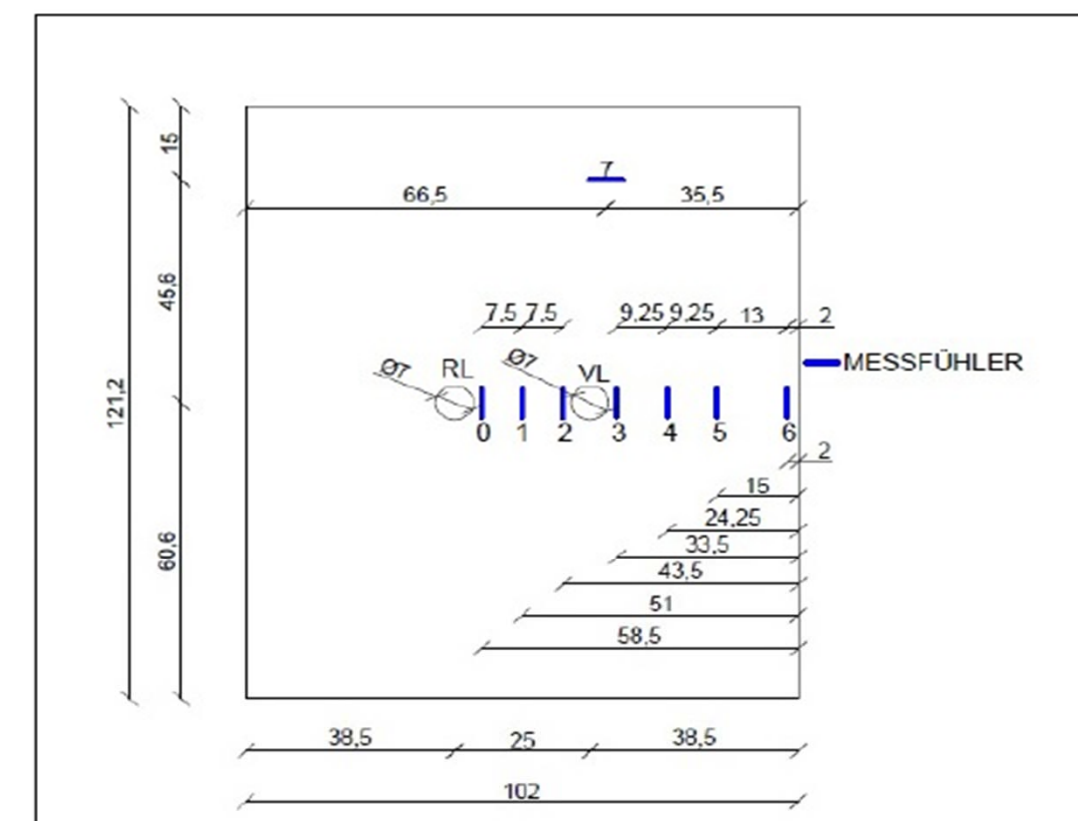
Auswertung der Raumtemperaturmessdaten	
Ganglinie	
Nikola Stanisljevic	
Datum: 26.09.2014	Plannummer: 3

## **7.6 Ganglinie der Wärmeleitfähigkeit**

### Ganglinie der Wärmeleitfähigkeit

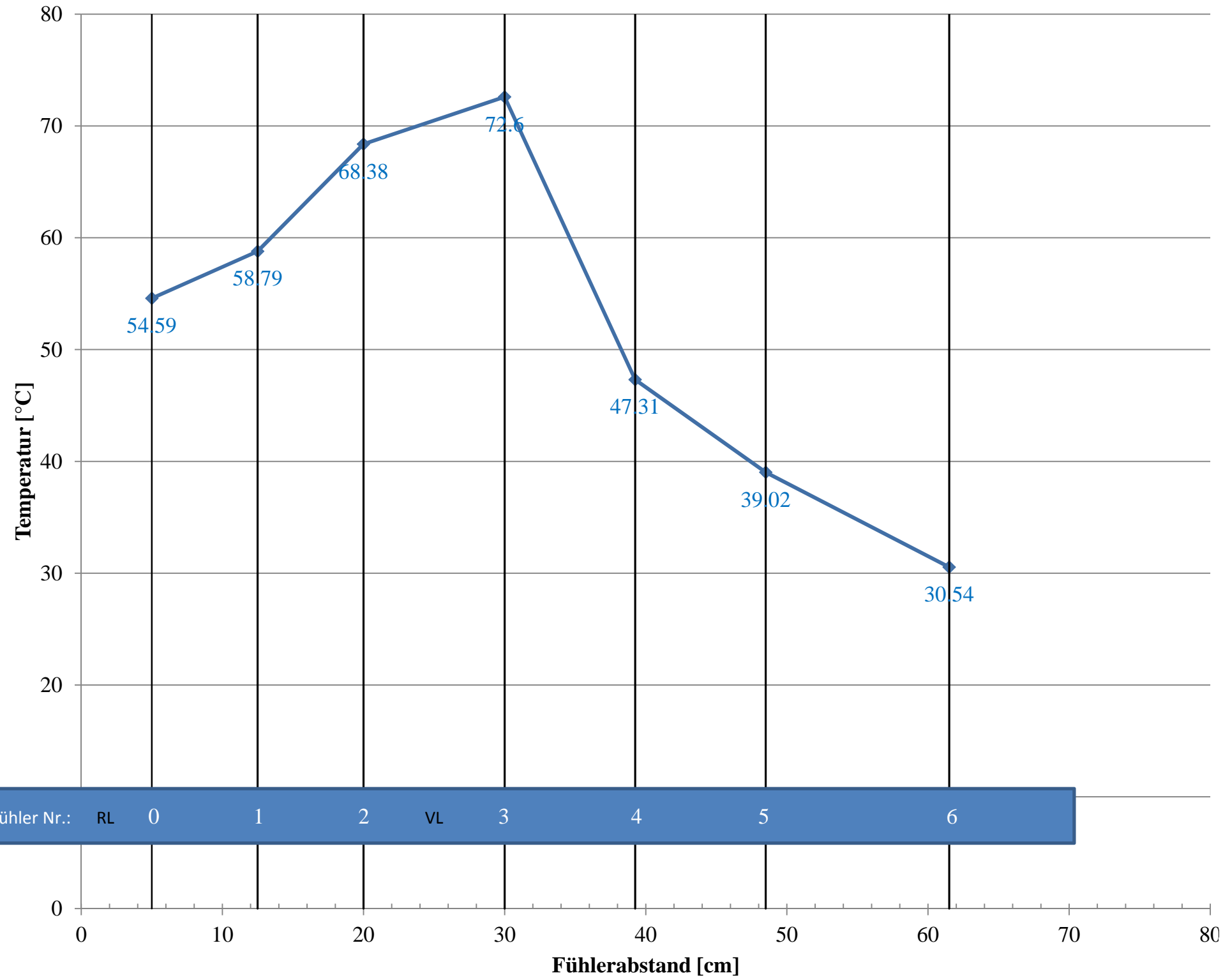


— Wärmeleitfähigkeit



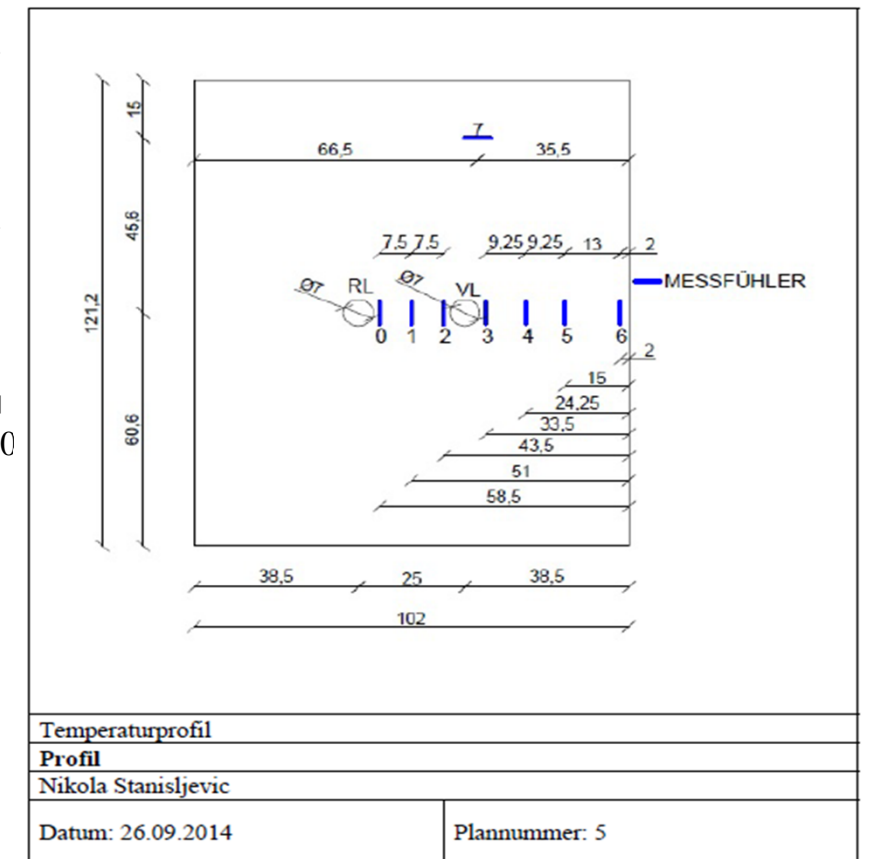
## **7.7 Temperaturprofil**

# Temperaturprofil



◆ 05.09.2014 04:23

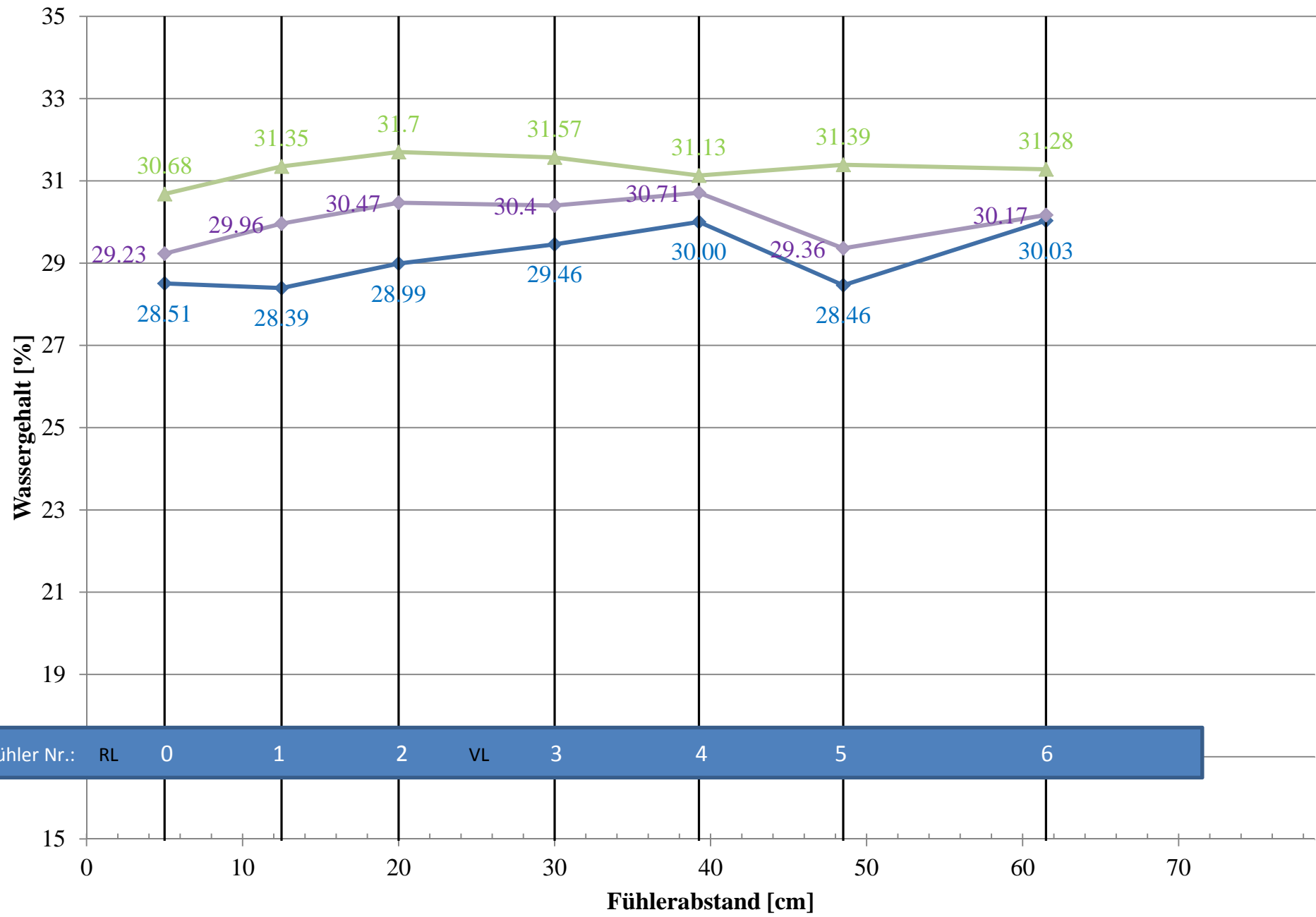
Fühler Nr.: RL 0 1 2 VL 3 4 5 6



## **7.8 Wassergehaltsprofile**

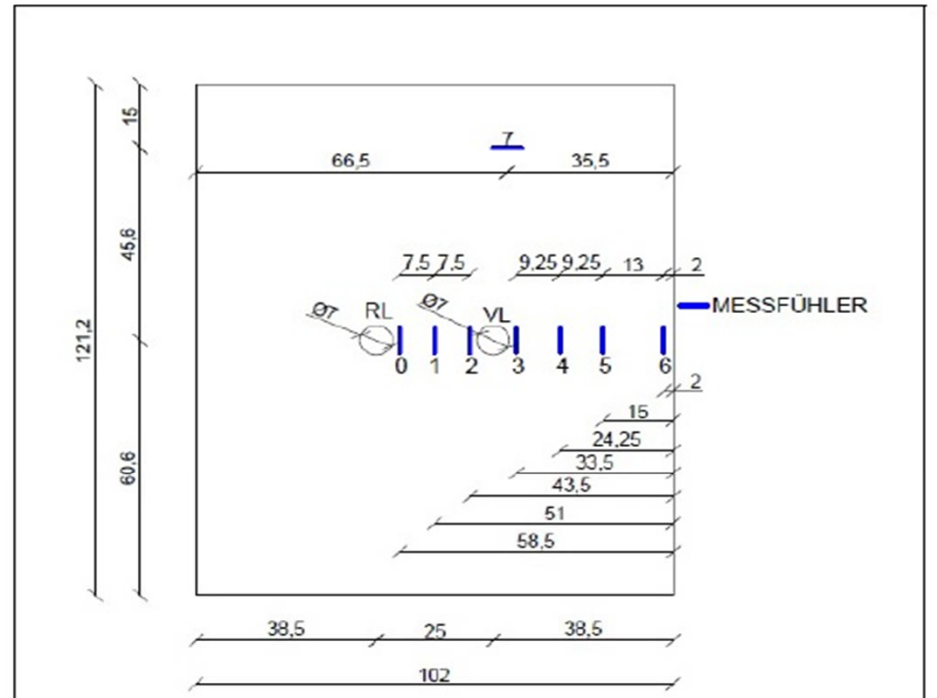


# Wassergehaltsprofile



- ◆ 05.09.2014 04:23
- ▲ 13.09.2014 22:26
- ◆ 19.09.2014 13:54

Fühler Nr.:	RL	0	1	2	VL	3	4	5	6
-------------	----	---	---	---	----	---	---	---	---



Wassergehaltsprofile	
Profil	
Nikola Stanisljevic	
Datum: 26.09.2014	Plannummer: 6